



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ**

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**VÝVOJ NOVÉ TECHNOLOGIE ZTEKUCENÍ  
A STABILIZACE ZEMIN**

DEVELOPMENT A NEW TECHNOLOGY OF LIQUEFACTION AND SOIL STABILIZATION

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

DIPLOMA THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Jakub Chlachula**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**prof. Ing. ROSTISLAV DROCHYTKA, CSc.,  
MBA**

**BRNO 2018**



## VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	N3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
<b>Pracoviště</b>	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

### ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Bc. Jakub Chlachula
<b>Název</b>	Vývoj nové technologie ztekucení a stabilizace zemin
<b>Vedoucí práce</b>	prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
<b>Datum zadání</b>	31. 3. 2017
<b>Datum odevzdání</b>	12. 1. 2018

V Brně dne 31. 3. 2017

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Vedoucí ústavu



prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

ŠIMEK, J. Mechanika zemin. Vyd. 1. Praha, SNTL, 1990, 387 s. ISBN 80-03-00428-4.

ŠAMALÍKOVÁ, M. Geologie a inženýrská geologie, 1989, 250 s. ISBN 80-214-0025-0.

IGLES, O., METCALF, J. Soil stabilization: principles and practice. 1972, 374 p. ISBN 04-094-8215-3.

SHERWOOD, P. T. Soil stabilization with cement and lime. State of art Review. London: Transport Research Laboratory, 1993, HMSO, 153 p. ISBN: 0-11-551190-3.

BELL, F. G. Ground Engineer's Reference Book. London, Boston: Butterworths, 1987, 800 p. ISBN 978-0408011730.

ČSN CEN ISO/TS 17892-12 Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 12: Stanovení konzistenčních mezí.

ČSN EN 12350-5 Zkoušení čerstvého betonu - Část 5: Zkouška rozlitím.

Dílčí zprávy ústavu THD, příspěvky ze sborníků konferencí, odborné články, firemní literatura, časopisy, normy.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

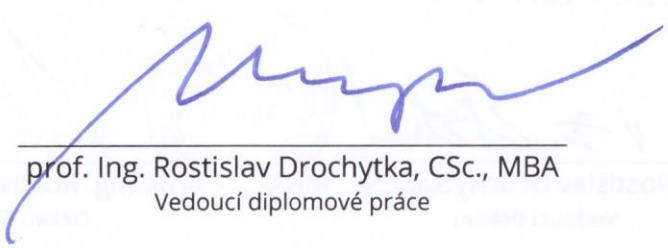
V současné době se při zemních pracích provádí ukládání sypkých zemin následným hutněním. Méně vhodné zeminy jsou odváženy na skládky. Možnosti úpravy zemin pomocí vhodných pojiv a ztekucujících přísad může vést k vývoji nové technologie ztekucení zeminy a jejich zpevnění. Cílem diplomové práce je navrhnout vhodnou technologii úpravy zemin tak, aby bylo možné jejich zpětné využití ve ztekucené formě. Výsledná směs bude splňovat optimální reologické a fyzikálně-mechanické parametry.

1. Zhodnoťte situaci využitelnosti zemin na území ČR. Uveďte charakteristiku relevantních typů zemin ze stavební činnosti. Proveďte návrh (před)úpravy zemin pro jejich následné využití.
2. Zhodnoťte v současnosti známé druhy stabilizačních přípravků a jejich vliv na stabilizaci zemin.
3. Uveďte přehled vhodných typů ztekucujících přísad z hlediska působení na stabilizované zeminy.
4. Na základě poznatků předchozích částí navrhnete a experimentálně ověřte možnosti stabilizace zemin pomocí různých druhů a množství stabilizačních činidel v závislosti na typu zeminy.
5. Na stabilizovaných zeminách ověřte možnost použití různých druhů ztekucujících přísad.
6. Zhodnoťte technicky i ekonomicky dosažené výsledky a navrhnete technologii stabilizace a ztekucení vybraných typů zemin.

## STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Vedoucí diplomové práce

## ABSTRAKT

V dnešní době je snahou sledovat vlivy související s dopadem na naši ekologii a zabývat se odpadovým hospodářstvím. Výkopové zeminy jsou brány jako odpad, a proto často končí na skládkách deponiích, či mezideponiích. Snahou je tyto zeminy zužítkovat. Přidáním vhodných stabilizačních přísad se dají upravit vlastnosti, jako je mez tekutosti, vlhkost, či pevnost v tlaku. Tento kompozit je možné dále ztekutit za použití vody a vhodných ztekucujících, či plastifikačních přísad. Takto ztekucené zeminy mohou být použity jako zpětná samozhutnitelná zálivka do výkopů, určených pro pokládku inženýrských sítí. Výhodou zálivek je nízká finanční náročnost a zpětné využití zemin, které by jinak končily na skládkách. V rámci zpracování této práce bude zhodnocena situace využitelnosti zemin na území ČR a budou popsány možné technologie jejich úpravy. Dále budou zhodnoceny a ověřeny v současnosti známé druhy stabilizačních přísad a jejich vliv na stabilizaci zemin. Následně budou zhodnoceny a ověřeny různé druhy plastifikačních a ztekucujících přísad. Cíl práce se zaměřuje na vývoj nové technologie ztekucení a stabilizace zemin.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Diplomová práce, zemina, jíl, stabilizace, plastifikační přísada, ztekucení, samozhutnitelná zálivka, vápno, cement

## ABSTRACT

Nowadays, efforts are being made to reduce the environmental impact on the planet even at soils management. Excavated soils are treated as waste and often end up in landfill or depot landfills. It is an effort to exploit these soils. By adding suitable stabilizing additives, features such as yield fluidity, moisture or compressive strength can be adjusted. This composite can be further liquefacted by using water and suitable liquefiers or plasticizers. Such iquefacted soils are a suitable self-compacting grouts dressing for excavation for the laying of utility grids, where it is necessary to fill the hole again. The advantage are low economic demands and the absence of excess waste. In the course of this thesis the situation of soil usability in the

Czech Republic will be evaluated and possible technologies of soil adjusters will be described. Further, the known types of stabilizing additives and their influence on soil stabilization will be evaluated and verified. Then, different types of liquefying and plasticizing additives will be evaluated and verified. The aim of the thesis is to develop a new technology of liquefaction and soil stabilization.

## **KEYWORDS**

Diploma thesis, soil, clay, stabilization, plasticizers, liquefy, self-compacting grouts, lime, cement

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

Bc. Jakub Chlachula *Vývoj nové technologie ztekucení a stabilizace zemin*. Brno, 2018. 109 s., 6 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 11. 1. 2018

---

Bc. Jakub Chlachula  
autor práce

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Rostislavu Drochytzkovi, CSc., MBA za odborné vedení diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Vítu Černému Ph.D. a Ing. Magdaléně Kociánové, za cenné rady a čas, který mi poskytovali v průběhu vypracování této diplomové práce.

V neposlední řadě bych rád poděkoval mé rodině a přítelkyni za podporu v průběhu studia a při zpracování této práce.

Diplomová práce byla vytvořena s využitím infrastruktury Centra AdMaS při řešení projektu FV10118 „Progresivní bezodpadová technologie zpětného využití zemin ve formě samozhutnitelných zálivek“, podporovaného Ministerstvem průmyslu a obchodu.



# OBSAH

1	ÚVOD .....	3
2	DEFINICE A POŽADAVKY PRO PRÁCI SE ZEMINOU.....	4
2.1	Definice zeminy .....	4
2.2	Zemina jako odpad .....	5
2.3	Požadavky na obsah škodlivin v odpadech využívaných na povrchu terénu .....	7
2.4	Stavební Povolení a ohlášení výkopových prací .....	8
2.5	Výkopové práce a minimální krycí vrstvy .....	9
3	PŘEDÚPRAVA ZEMINY .....	12
3.1	Předpoklad pro výkopové práce .....	12
3.2	Odstranění nevhodných frakcí zeminy .....	12
3.3	Odstranění biologického materiálu.....	15
3.4	Zdrobňování kusů jílovitých zemin .....	16
3.5	Průběh nákladky, mísení a výkladky .....	16
4	POŽADAVKY NA KONEČNÝ MATERIÁL .....	18
4.1	Konzistence .....	19
4.2	Doba tuhnutí a tvrdnutí.....	19
4.3	Pevnost v tlaku.....	20
4.4	Objemové změny .....	20
5	STABILIZACE ZEMIN .....	21
5.1	Stabilizace zemin pomocí vápna.....	21
5.2	Stabilizace zemin pomocí cementu.....	23
5.3	Stabilizace zemin pomocí popílku .....	24
6	ZTEKUCENÍ ZEMIN .....	26
7	CÍL PRÁCE.....	28
8	METODIKA PRÁCE.....	29
9	METODIKA ZKOUŠEK .....	33
9.1	Zrnitost zemin .....	33
9.2	Provádění zkoušek v čerstvém stavu .....	34
9.2.1	Zkouška sednutí-rozlítím dle ČSN EN 12350 - 8 .....	34
9.2.2	Stanovení dob tuhnutí dle ČSN EN 196-3.....	36
9.3	Provádění zkoušek v zatvrdlém stavu .....	39
9.3.1	Pevnost v tlaku zkušebních těles dle ČSN EN 12390-3 .....	39
9.3.2	Smrštění.....	40
10	ETAPA 1 - CHARAKTERIZACE VSTUPNÍCH SUROVIN.....	42
10.1	Zeminy.....	42
10.1.1	Jílovitá zemina.....	42

10.1.2	Písčítá zemina .....	43
10.2	Cement.....	45
10.3	Vápno.....	45
10.4	Plastifikační přísada .....	45
10.4.1	Sika ViscoCrete – 1062 .....	46
10.4.2	Sika ViscoCrete – 21 .....	46
10.4.3	Sika ViscoCrete – 4088 .....	47
10.5	Voda .....	48
11	ETAPA 2 - VLIV STABILIZAČNÍCH PŘÍRAD .....	49
11.1	Zkoušení směsí jílovité zeminy s vápnem.....	49
11.2	Zkoušení směsí jílovité zeminy s vápnem a 2 % cementu .....	52
11.3	Zkoušení směsí jílovité zeminy s vápnem a 4 % cementu .....	55
11.4	Zkoušení směsí jílovité zeminy s vápnem a 6 % cementu .....	57
11.5	Zkoušení směsí písčité zeminy s vápnem .....	60
11.6	Zkoušení směsí písčité zeminy s vápnem a 2 % cementu.....	63
11.7	Zkoušení směsí písčité zeminy s vápnem a 4 % cementu.....	65
11.8	Zkoušení směsí písčité zeminy s vápnem a 6 % cementu.....	68
12	ETAPA 3 - VLIV ZTEKUCUJÍCÍCH PŘÍRAD .....	71
12.1	Zkoušení směsí jílovité zeminy s 1,5 % vápna, 2 % cementu a plastifikační přísadou Sika ViscoCrete – 1062.....	71
12.2	Zkoušení směsí jílovité zeminy s 1,5 % vápna, 4 % cementu a plastifikační přísadou Sika ViscoCrete – 1062.....	74
12.3	Zkoušení směsí jílovité zeminy s 1,5 % vápna, 2 % cementu a plastifikační přísadou Sika ViscoCrete – 21.....	77
12.4	Zkoušení směsí jílovité zeminy s 1,5 % vápna, 2 % cementu a plastifikační přísadou Sika ViscoCrete – 4088 .....	79
12.5	Zkoušení směsí písčité zeminy s 1,5 % vápna, 2 % cementu a plastifikační přísadou Sika ViscoCrete – 1062.....	82
12.6	Zkoušení směsí písčité zeminy s 1,5 % vápna, 4 % cementu a plastifikační přísadou Sika ViscoCrete – 1062.....	84
12.7	Zkoušení směsí písčité zeminy s 1,5 % vápna, 2 % cementu a plastifikační přísadou Sika ViscoCrete – 21.....	87
12.8	Zkoušení směsí písčité zeminy s 1,5 % vápna, 2 % cementu a plastifikační přísadou Sika ViscoCrete – 4088.....	89
13	ETAPA 4 – OVĚŘENÍ TECHNOLOGIE V PRAXI .....	92
14	SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ.....	97
15	ZÁVĚR.....	102
16	ZDROJE.....	104
	SEZNAM ZKRATEK.....	107
	SEZNAM PŘÍLOH.....	109

# 1 ÚVOD

Inženýrské sítě jsou pro nás v moderní společnosti již naprosto běžná věc a život bez nich si téměř neumíme představit. Voda, kanalizace i elektřina jsou často vedeny pod pozemními komunikacemi, či chodníky a uspokojují tak naše potřeby.

V dnešní době se při realizaci inženýrských sítí vyprodukuje velké množství zeminy, které se ve většině případů odváží na deponie, mezideponie, či skládky. Toto hospodaření je neekologické a neekonomické. Proto se hledají způsoby, jak se zeminou, mající různé složení či frakci, nakládat a znovu ji ve stavebnictví využít. Jednou z možností jak zeminu využít, je vrátit vykopanou surovinu zpět do výkopu. Aby byl tento proces možný a efektivní, je potřeba zeminu upravit. V první řadě je nutné si určit, jaké vlastnosti by měla takto využitá zemina mít.

Důležité parametry ztekucených zemin jsou rozlití, pevnost v tlaku a objemová stálost. Jelikož jsou ve výkopu položeny již zmíněné inženýrské sítě, je potřeba, aby byly zeminou dokonale obklopeny. Jako řešení se jeví ztekucení zemin provedené přidáním vody a ztekucujících přísad. Dalším kritériem je výsledná pevnost zeminy, která zaručí ochranu inženýrských sítí. Pevnost zeminy lze upravovat použitím optimálního množství a druhu stabilizačních přísad, jako je vápno či cement. Vápno má při stabilizaci zemin pozitivní vliv především na jílové minerály, u kterých omezí objemové změny spojeny s vysycháním, či absorpcí vody. Cement tvoří s vodou hydratační produkty, které zeminám zvyšují pevnost v tlaku. Výsledný kompozit by měl dosahovat pevnosti jako dobře zhutněná zemina, tedy hodnoty okolo 0,2 – 0,3 MPa po 28 dnech zrání.

Takto vytvořený tekutý kompozit by plnil funkci pískového obsypu, jenž se dnes v praxi využívá. Navíc by odpadla potřeba hutnění, dovozu písku a odvozu vykopané zeminy. Proces vytvoření ztekucených zemin ve formě zpětných samozhutnitelných zálivek by šetřil čas, peníze a omezil vznik odpadů.

## 2 DEFINICE A POŽADAVKY PRO PRÁCI SE ZEMINOU

Pod pojmem zpětné samozhutnitelné zálivky si lze představit tekutou směs složenou z jemného kameniva (0 – 2), plniva, vody a pojiv. Předmětem mé práce bylo využít jako plniva zeminu z výkopových prací. Při návrhu směsí se vycházelo z receptur samozhutnitelných zálivek z rešeršní činnosti. Jako pojiva byly použity vápno a cement. Tento materiál lze používat jako zpětnou zálivku na místo kde je potřeba, aby zeminy dosahovaly určitých pevností a jiných charakteristik. Tato směs je schopna vyplňovat všechny nepravidelné výkopy a těžko přístupná místa (např. pod a kolem potrubí), je samozhutňující a měla by se ukládat bez nutnosti hutnění. Je tedy vhodnou náhradou za zpevněné zeminy.

Ztekucené zeminy jako samozhutnitelné zálivky lze použít především v aplikacích, jako jsou výkopy pro inženýrské sítě, kde je vyžadovaná nízká pevnost a snadné umístění.

### 2.1 DEFINICE ZEMINY

Nejprve je nutno si definovat, co to zemina je. V praxi se setkáváme s tím, že se za pojem zemina zaměňují jiné pojmy, jako například půda či hlína. Každý tento pojem představuje něco trochu jiného. Ministerstvo životního prostředí [1] uvádí definici zeminy a půdy takto:

- zemina - vrstva na zemském povrchu, jejíž částice nejsou vzájemně pevně spojeny, jde o pojem nadřazený pojmu půda,
- půda - přírodní vrstva na zemském povrchu vznikající z povrchových zvětralin a organických zbytků; na rozdíl od zeminy je vždy oživenou vrstvou zemské kůry.

Dle normy ČSN EN ISO 14668-1 Pojmenování a popis zemin [2] je napsáno, že zeminy jsou v inženýrské terminologii označovány jako nezpevněné nebo slabě zpevněné horniny. Horniny jsou přírodní minerální seskupení různého složení a struktury, které vznikly působením geologických procesů [2].

Dále se setkáváme s pojmem hlína, jejíž definice podle [3] zní:

- hlína - je z geologického hlediska soudržná zemina (nezpevněná hornina), která se skládá z částic různé velikosti, vždy však menších než 2 milimetry.

Nutno podotknout, že české zákony pojem zemina přímo nedefinují. Taktéž není vymezeno, jakých parametrů má dosahovat, respektive zda se jedná například o zeminu písčitou, či jílovitou.

## **2.2 ZEMINA JAKO ODPAD**

Proč bývá zemina z výkopových prací označována jako odpad? Zemina, která vzniká při výkopových pracích základů staveb, inženýrských sítí atd., se často pro subjekt stává v místě stavby neupotřebitelnou. Dle definice pojmu odpad [4] se zeminy osoba v takovém případě v rámci stavby zbavuje, přičemž její následné využití není často jisté a zemina ve většině případů končí na různých typech shromažďovacích či skladovacích ploch, které nazýváme deponie či mezideponie. Tyto deponie a mezideponie jsou dočasné skladovací plochy v okolí stavby, kde se ukládají zeminy.

Odpadem je movitá věc, které se osoba zbavuje nebo má úmysl nebo povinnost se jí zbavit [4]. Přičemž úmysl se předpokládá vždy, když věc vznikla podnikatelskému subjektu jako vedlejší produkt výroby nebo při poskytování služeb. Další možností je, že původní účelové určení věci odpadlo. Zákon [4] rovněž stanoví, a to je velmi důležité si uvědomit, že vlastník věci, nikoli správní orgán, má povinnost prokázat své tvrzení, že se v konkrétním případě dle jeho názoru o odpad nejedná. Pokud toto prokázáno není, předpokládá se, že věc je odpadem.

Vzhledem k tomu, že odpadní výkopová zemina vzniká při poskytování služeb typu zemní práce či zakládání staveb, předpokládá se, že pokud není zemina využita v rámci původní stavby, je odpadem. Jistě nemůžeme říci, že stavbu či výkopy na stavbě provádíme primárně kvůli získání zeminy, že to je hlavní účel této činnosti a že samotná stavba je až sekundárním výsledkem našeho konání. Nikoli, vznik zeminy je zpravidla vedlejším aspektem provádění stavby. Pro lepší pochopení uveďme opačný příklad, a to stav, kdy zemina ve vztahu k primární činnosti nebude odpadem. K tomuto může dojít například v případě, že zemina bude záměrně těžena v k tomu určených zařízeních typu „zemník“ z důvodu jejího chtěného získání, např. jako součást receptury pro výrobu různých typů zahradních substrátů apod. [5].

Konstrukce zákona o odpadech [4] respektuje jeden z důležitých principů evropského práva a tím je „princip předběžné opatrnosti“. Zákon tedy obecně stanoví,

že s odpady lze nakládat pouze v místech, která jsou k tomuto účelu nějakým způsobem určena (nejčastěji rozhodnutím krajského úřadu – KÚ). K tomu, aby subjekt v konkrétním místě, mimo místo jejich vzniku, nakládal s odpady či je přebíral, je zpravidla nutný souhlas krajského úřadu dle § 14 odst. 1 zákona o odpadech [4]. V případě výkopových zemin však MŽP i ČIŽP dlouhodobě přistupuje na možnost, že využívání odpadních výkopových zemin je možné i mimo zařízení schválená krajskými úřady.

V takovém případě je však nezbytné, aby např. předmětná terénní úprava, kde chceme využít odpadní výkopovou zeminu, byla povolena ze strany stavebního úřadu. V předmětném povolení, ať už bude mít jakoukoliv stanovenou formu, je nezbytné, aby byla určena podmínka, že v rámci stavby či úpravy bude využívána odpadní výkopová zemina katalogového čísla 17 05 04 nebo 17 05 06 a že budou splněny další zákonné požadavky vztahující se k tomuto způsobu využití odpadu. Mezi tyto požadavky patří např. vedení evidence o odpadech, neboť zemina stále zůstává odpadem, splnění požadavků vyhlášky č. 294/2005 Sb. [6], které stanoví limity pro uložení odpadů na povrch terénu, nebo povinnost ohlášení zařízení dle ustanovení § 39 odst. 3 zákona o odpadech. Pokud následně proběhne kontrola ze strany ČIŽP na podobné lokalitě, bude při splnění stanovených podmínek tato kontrola, vnímána jako zařízení dle ustanovení § 14 odst. 2 zákona o odpadech. [5]

Zákonné nakládání s odpadní výkopovou zeminou je tedy poměrně snadné a zpravidla nemusí znamenat významnější dodatečné náklady. Současně jsou při tomto přístupu zajištěny i aspekty ochrany životního prostředí. Je však nutné zdůraznit, že podobný režim platí pouze pro výkopovou zeminu a hlušiny, kde existují reálné předpoklady příhodných mechanických a fyzikálních vlastností a nikoli pro další stavební či jiné odpady. [5]

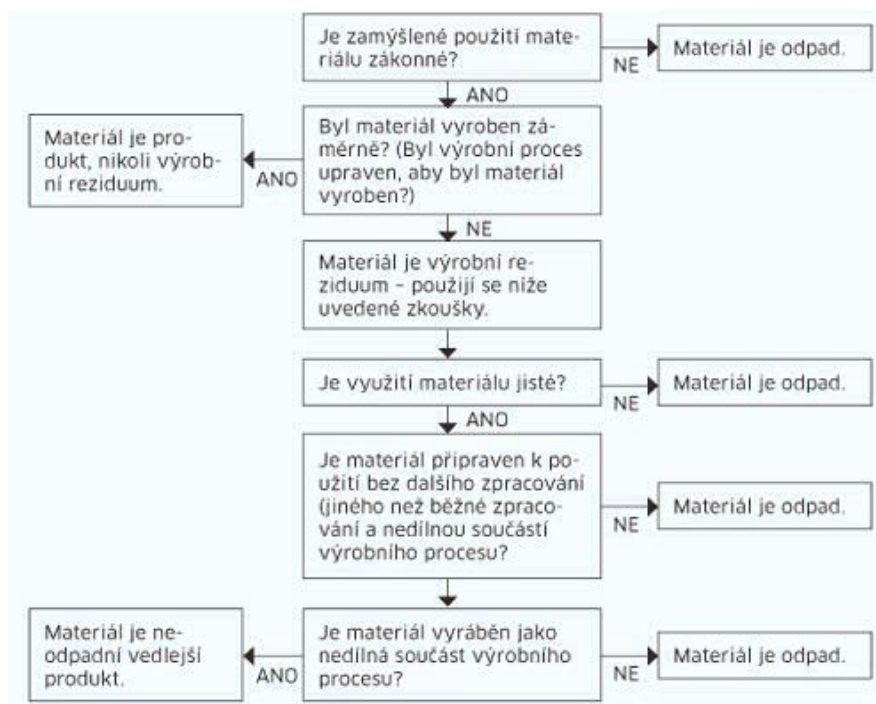
Jak již bylo zmíněno, tak vyhláška 93/2016 Sb., o Katalogu odpadů [7] stanovuje stavební a demoliční odpady (včetně vytěžené zeminy z kontaminovaných míst). Do těch patří zeminy uvedeny v následující Tabulce 2.1, kde „\*“ značí nebezpečný odpad.

**Tabulka 2.1 Zeminy v katalogu odpadů dle [7]**

17 05 03*	Zemina a kamení obsahující nebezpečné látky
17 05 04	Zemina a kamení neuvedené pod číslem 17 05 03
17 05 05*	Vytěžená hlšina obsahující nebezpečné látky
17 05 06	Vytěžená hlšina neuvedená pod číslem 17 05 05

17 05 07*	Štěrk ze železničního svršku obsahující nebezpečné látky
17 05 08	Štěrk ze železničního svršku neuvedený pod číslem 17 05 07

O tom, kdy se z odpadu může stát druhotný produkt, pojednává Obrázek 2.1.



Obrázek 2.1 Schéma, kdy se může stát z odpadu vedlejší produkt [8]

## 2.3 POŽADAVKY NA OBSAH ŠKODLIVIN V ODPADECH VYUŽÍVANÝCH NA POVRCHU TERÉNU

Vyhláška č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu [6] a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady [9], příloha č. 10 určuje, jaké jsou limitní koncentrace škodlivých látek v odpadech. Tyto koncentrace znázorňuje Tabulka 2.2.

Tabulka 2.2 Limitní koncentrace škodlivin v sušině odpadu dle [6]

Ukazatel	Jednotka	Limitní hodnota
Kovy		
As	mg/kg sušiny	10
Cd	mg/kg sušiny	1
Cr celk.	mg/kg sušiny	200
Hg	mg/kg sušiny	0,8
Ni	mg/kg sušiny	80

Pb	mg/kg sušiny	100
V	mg/kg sušiny	180
Monocyklické aromatické uhlovodíky (nehalogenované)		
BTEX	mg/kg sušiny	0,4
Polycyklické aromatické uhlovodíky		
PAU	mg/kg sušiny	6
Chlorované alifatické uhlovodíky		
EOX	mg/kg sušiny	1
Ostatní uhlovodíky (směsné, nehalogenované)		
Uhlovodíky C <sub>10</sub> -C <sub>40</sub>	mg/kg sušiny	300
Ostatní aromatické uhlovodíky (halogenované)		
PCB	mg/kg sušiny	0,2

Použité zkratky:

- BTEX - suma benzenu, toluenu, ethylbenzenu a xylenu.
- PAU - polycyklické aromatické uhlovodíky (suma antracenu, benzo(a)antracenu, benzo(a)pyrenu, benzo(b)fluoranthenu, benzo(ghi)perylenu, benzo(k)fluoranthenu, fluoranthenu, fenanthrenu, chrysenu, indeno(1,2,3-cd)pyrenu, naftalenu a pyrenu).
- EOX - extrahovatelné organicky vázané halogeny.
- PCB - polychlorované bifenyly (suma kongenerů č. 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180).

## 2.4 STAVEBNÍ POVOLENÍ A OHLÁŠENÍ VÝKOPOVÝCH PRACÍ

Důležité je zjistit, kdy je potřebné pro dané výkopové práce žádat o stavební povolení a kdy je třeba pouze ohlášení. Dle Zákona o územním plánování a stavebním řádu [10] nevyžadují rozhodnutí o změně využití území ani územní souhlas terénní úpravy do 1,5 m výšky nebo hloubky o výměře do 300 m<sup>2</sup> na pozemcích, které nemají společnou hranici s veřejnou pozemní komunikací nebo veřejným prostranstvím, pokud nedochází k nakládání s odpady.

Ohlášení stavebnímu úřadu vyžadují podzemní stavby do 300 m<sup>2</sup> celkové zastavěné plochy a hloubky do 3 m, pokud nejsou vodním dílem nebo stavbou podle § 16 odst. 2 písm. d [10]. Podle Zákona o územním plánování a stavebním řádu [10] rozhoduje ministerstvo průmyslu a obchodu u staveb určených k: účelům těžby, zpracování, transportu a ukládání radioaktivních surovin na území vyhrazeném pro tyto



účely, u staveb souvisejících s úložišti radioaktivních odpadů, obsahujících výlučně přírodní radionuklidy, u staveb, které jsou jaderným zařízením nebo náležejí k provozním celkům a u staveb či zařízení pro přenos elektřiny, přepravu plynu, uskladňování plynu nebo výroby elektřiny o celkovém instalovaném elektrickém výkonu 100 MW a více.

Na ostatní stavby je potřeba stavební povolení. Stavební povolení vyžadují například komunikace (silnice, chodníky), přípojky na kanalizaci a rozvodné sítě (vodovod, plynovod, elektřina, rozvody tepla) nebo podzemní stavby hlubší než 3 metry.

Z toho vyplývá, že pokud se budou aplikovat ztekucené zeminy kolem inženýrských sítí, bude potřeba stavební povolení.

## **2.5 VÝKOPOVÉ PRÁCE A MINIMÁLNÍ KRYCÍ VRSTVY**

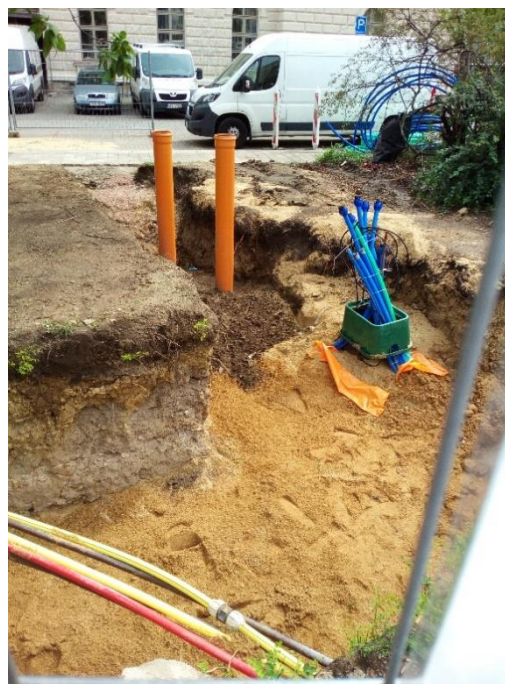
Inženýrské sítě jsou v mnoha případech ukládány do vyhloubených výkopů-otevřených rýh, které buď křížují pozemní komunikace (PK), nebo jsou s nimi v souběhu. Je nutné, aby v místech, kde rýhy nebo výkopy leží v oblasti konstrukce vozovky, zpevněné krajnice, nemotoristické komunikace, chodníku nebo jiné dopravní plochy (dále jen vozovky) či v jejich těsné blízkosti, bylo po provedení zásypu dosaženo maximální možné homogenity únosnosti vozovky a jejího podloží. Homogenita je zárukou minimalizace výskytů dodatečných deformací. Tento požadavek jednoznačně vyúsťuje v nutnost použití vhodných zásypových materiálů a jejich řádného zhutnění. V případě, kdy není možné z důvodů nebezpečí porušení podzemního vedení inženýrských sítí provést zhutnění zásypového materiálu na požadovanou míru zhutnění, je možné použít některé netradiční technologie, jako např. překrytí zásypu rýhy geosyntetikou, příp. použití asfaltových membrán s přesahem min. 0,5 m (doporučuje se 0,9 m zejména u širších rýh), nebo použít panely pro dlouhodobé zachycení a rovnoměrné roznesení napětí vyvolaného nehomogenitou podloží konstrukce vozovky, projevujícího se jeho dodatečným sedáním. Podmínky řešení, geotechnické poměry, fyzikálně mechanické vlastnosti zemin, geometrické uspořádání rýh a základní technologické postupy jsou specifické pro každou stavbu. [11]

Povolení k umístění výkopů a rýh v silničním pozemku (vozovce, chodnících, dopravních a dalších plochách) vydává ve smyslu zákona č. 13/1997 Sb., o pozemních

komunikacích [12] a prováděcí vyhlášky č. 104/1997 Sb. [13] (ve znění pozdějších předpisů) příslušný silniční správní úřad po předchozím souhlasu správce PK. Před vlastním zahájením výkopových prací je nutno prověřit umístění stávajících inženýrských sítí, které by mohly být dotčeny nově připravovanými výkopovými pracemi a podle jejich umístění zvolit odpovídající technologii výkopových prací. V dalším kroku se pak vyznačí na povrchu vozovky nebo chodníku průběh rýhy a její šířka s tím, že šířka rýhy se minimalizuje s ohledem na výkopové práce a vlastní ukládání vedení inženýrských sítí. Výkopové práce se nemají provádět od 1. listopadu do 31. března. V uvedeném termínu se nedoporučuje provádět ani konečnou obnovu konstrukce vozovky. Pokud v havarijních případech musí být prováděny výkopové práce v průběhu zimního období, provede se vhodným způsobem prozatímní obnova krytu [11]. Jak vypadá výkop s již položenými inženýrskými sítěmi (IS) ukazuje Obrázek 2.2. Zasypaný výkop, kde je použit písek, je znázorněn na Obrázku 2.3.



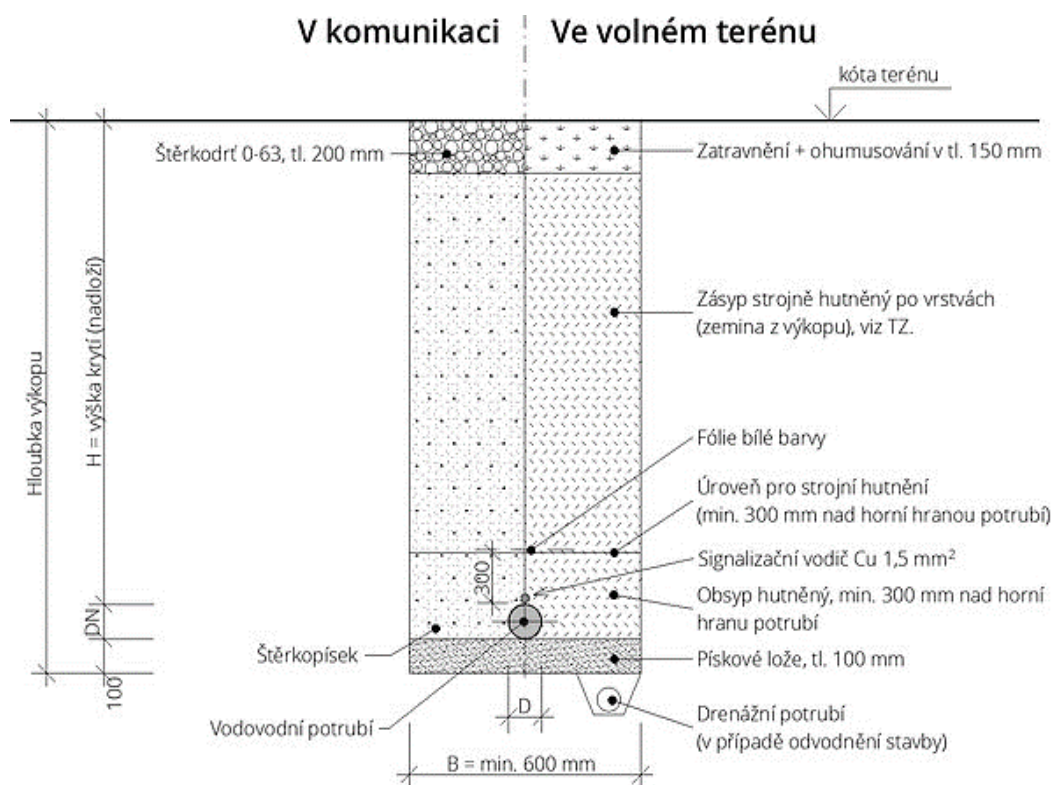
**Obrázek 2.2 Pohled na výkop s IS**



**Obrázek 2.3 Zasypaný výkop pískem**

Na Obrázku 2.4 lze vidět příklad výplně výkopu, v tomto případě pro vodovodní potrubí. Jedná se o běžné schéma používané v praxi. U ostatních inženýrských sítí je schéma podobné. Liší se pouze v detailech. Pro pokládku inženýrských sítí je potřeba nasypat pískové lože, na které se pokládá potrubí se signalizačním vodičem. Je-li potřeba

odvodnit výkop, je možné na dno výkopu umístit drenážní potrubí. Po umístění pískového lože a inženýrské sítě dochází k obsypu do výšky 300 mm nad úroveň signalizačního vodiče. Dále se na povrch obsypu položí barevné fólie odpovídající jednotlivým inženýrským sítím. Ve volném terénu následuje zásyp a zatravnění. V komunikaci se na zásyp pokládá šterkodř. Je vhodné si všimnout, že dle schématu (Obrázek 2.4) je většina vrstev potřeba hutnit.



**Obrázek 2.4 Příklad hloubky uložení vodovodního potrubí [14]**

Pro pokládku inženýrských sítí jsou dány minimální vrstvy krytí. Tyto vrstvy slouží k ochraně inženýrských sítí a lze z nich vyvodit hloubku výkopu a tím pádem i množství vykopané zeminy (viz Tabulka 2.3).

**Tabulka 2.3 Minimální dovolené krytí IS [14]**

Sít/povrch	Chodník	Vozovka	Terén (pole)
Silové kabely do 1 kV (nn)	0,35	1	0,3-0,7
Detto do 110 kV	1,3	1,3	1,3
Plynovod	0,8	1	0,8
Vodovod	1-1,6 dle izolačních vlastností půdy	1,2	1-1,6
Tepelné vedení	0,5	1	0,5
Kolektor	0,5	1	0,5

### 3 PŘEDÚPRAVA ZEMINY

Aby bylo možné zeminu znovu použít do výkopu a stabilizovat, je potřeba ji předupravit. Touto předúpravou se myslí odstranění nevhodné frakce, odstranění biologického materiálu, či přímo zdrobňování jílovitých kusů zeminy.

#### 3.1 PŘEDPOKLAD PRO VÝKOPOVÉ PRÁCE

Klasifikace zeminy je velice důležitý proces, díky jemuž jsme schopni dále se zeminou pracovat. Jinak se budou chovat zeminy sprašové a jinak zeminy písčité. Předpokládá se, že sprašové zeminy v důsledku jemnější frakce pojmu více vody, než ty písčité. Na tento předpoklad také navazují další vlastnosti, které budou popsány v kapitole 4. Pro potřeby této práce je požadováno, aby byly zajištěny dva typy zemin, a to zeminy sprašová a písčité. Dle geologické mapy [15] se předpokládá, že zemina vykopaná v okolí výzkumného centra AdMaS bude sprašová. Druhá zemina se zajistí z oblasti Brno – Černovice, kde se předpokládá dle geologické mapy [15] vykopání písčité zeminy.

#### 3.2 ODSTRANĚNÍ NEVHODNÝCH FRAKČÍ ZEMINY

Při opětovném použití vykopané zeminy je potřeba odstranit velké frakce kameniva, které by mohly nepříznivě ovlivňovat jak soudržnost, tak ztekucení. Tyto frakce by také mohly poškodit zalité inženýrské sítě. Nevhodné frakce kameniva by se mohly odstraňovat *in situ* pomocí různých strojů, či strojového příslušenství. Vhodným řešením by byl například nástavec *Flexifinger® Quicker Picker* na smykem řízené nakladače (viz Obrázek 3.1) [16].

Tento nástavec je až třikrát účinnější než klasický nástavec na kamení (v angličtině „*rock bucket*“). Nástavec zeminu nabere a setřesením způsobí propad frakcí menších než mezery mezi zuby nástavce (viz Obrázek 3.2). *Flexifinger® Quicker Picker* funguje na principu odstředivé síly, kde se pomocí rotace koše se zeminou oddělují menší frakce od velkých kamenů (viz Obrázek 3.3), které zůstávají v koši s možností jejich vyložení kdekoli na staveništi [16].

Nástavec *Flexifinger® Quicker Picker* byl původně zkonstruován pro farmáře a krajinářství, ale jeho možnosti by našly využití také v problematice oddělení hrubších zrn (nad 16 mm) z vykopaných zemin.





**Obrázek 3.1 Nástavec Flexxifinger® Quicker Picker [16]**



**Obrázek 3.2 Nástavec na kamení [17]**



**Obrázek 3.3 Flexxifinger® Quicker Picker [18]**

Jako další možnost se jeví použití mobilního třídiče, či drtiče kameniva (viz Obrázek 3.4). Třídiče fungují na principu sít, které vykonávají kmitavý pohyb. Díky pohybu propadává menší frakce přes síto, na síto s menší velikostí oka.



**Obrázek 3.4 Třídič kamení [19]**

Drtiče pak drtí kamenivo na menší frakce (viz Obrázek 3.5). Typů drtičů existuje celá řada, ať jako nástavce na techniku (traktor, bagr, atd.), či jako samostatné jednotky.





**Obrázek 3.5 Drtič kamení na traktoru [20]**

Dále je vhodné zmínit třídící lžíce (viz Obrázek 3.6). Tyto lžíce mají nastavitelnou velikost mezery, což umožní během pár minut změnit velikost propadávající frakce.



**Obrázek 3.6 Třídící lžíce [21]**

### **3.3 ODSTRANĚNÍ BIOLOGICKÉHO MATERIÁLU**

Pod biologickým materiálem si lze představit různé kořeny rostlin prorůstající zeminu, popřípadě i drobné živočichy. Kořeny z vykopané zeminy by bylo možné odstraňovat přímo s velkým kamenivem, jak je popsáno v předcházející kapitole 3.2. V případě, že by část kořenů propadla, bylo by nutné je odstranit ručně. Dle ČSN EN ISO 14688-2 [22] je přípustná hranice 6 % obsahu organického materiálu

v zeminách, které lze zatřídit jako středně organické zeminy. Pro zeminy s vyšším obsahem organických látek není stabilizace vhodná.

### **3.4 ZDROBŇOVÁNÍ KUSŮ JÍLOVITÝCH ZEMIN**

Jelikož zavlhlé jílovité zeminy tvoří pevné celky, je potřeba tyto celky zdrobňovat. Můžeme tak činit opět za pomoci nástavce *Flexifinger® Quicker Picker* popsaného v kapitole 3.2, či za pomoci jiných nástavců na smykem řízené nakladače.

V praxi se pro zdrobňování jílovitých celků používá prakticky cokoli, čím si můžou dělníci pomoci. Můžeme se setkat s ručním rozbíjením za pomoci sekacího kladiva, či přejetím různou kolovou, nebo válcovou technikou. Také můžeme použít drtiče kameniva, jak je popsáno v kapitole 3.2, ale je nutné vybrat vhodný drtič, jelikož mu hrozí zalepení jílovitou zeminou. Je možné také jíl nechat rozplavit, ale tato metoda není pro naše účely příliš vhodná [16].

### **3.5 PRŮBĚH NÁKLADKY, MÍSENÍ A VÝKLADKY**

Mísení zeminy, která je již zbavená nevhodných složek, by mohlo probíhat v míchačce s nuceným oběhem. Další možností je míchání pomocí míchaček určených pro mobilní betonárny (viz Obrázek 3.7). Pro ztekucené zeminy by mohla fungovat dostatečně a hlavně by bylo možné materiál vytvářet rovnou na stavbě, bez nutnosti zeminu kamkoli převážet. Do míchačky by k zemině stačilo přidat vodu, pojivo a případné další přísady. Pokud by byla potřeba, tak by bylo možné pro malé množství použít stavební míchačku. V případě, že by byla vzdálenost mezi míchačkou a vykládkou delší, lze použít autodomíchavače. Tyto stroje klasicky přepravují transportbeton na stavby, kde je potřeba betonáže. Vnitřní prostor bubny je vybaven šroubovicí, která při převážení udržuje daný beton v pohybu, aby bylo omezeno tuhnutí směsi.





**Obrázek 3.7 Planetární míchačka ORUMS [23]**

K naložení zeminy do autodomíchávače lze použít jakýkoli bagr, či traktor obsahující lžíci. Dalším řešením je použít mobilní pásový dopravník. Vykládka již hotové směsi by mohla probíhat jako při klasickém vyložení transportbetonu na stavbách. Ta probíhá litím betonové směsi, která míří na určené místo. Autodomíchávač také může obsahovat čerpadlo a tzv. rameno (viz Obrázek 3.8), které dosáhne i do vzdálenějších míst. Díky předpokládaným samozhutňujícím vlastnostem ztekucených zemin není potřeba materiál dodatečně hutnit. K tématu vykládky je třeba upozornit na předpoklad, že ztekucené zeminy budou dosahovat poměrně vysoké objemové hmotnosti, což může zapříčinit pohnutí obtékaných inženýrských sítí, či jakýchkoli jiných překážek nalézajících se v zalívané spáře [24].



**Obrázek 3.8 Autodomíchávač s ramenem [24]**

## 4 POŽADAVKY NA KONEČNÝ MATERIÁL

Jelikož zatím v České Republice neexistují normy, které by definovaly vlastnosti pro ztekucené zeminy ve formě zpětných samozhutnitelných zálivek, vychází se z norem zahraničních, především ASTM (American Society for Testing and Materials). V těchto normách jsou uvedeny některé požadavky na ztekucené zálivky, tzv. CLSM (Controlled Low Strength Material) a možnost jejich zkoušení. Přehled ASTM používaných u CLSM je popsán v Tabulce 4.1.

**Tabulka 4.1 Přehled norem ASTM používaných u CLSM [25]**

Pevnost v tlaku	Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil	ASTM D2166
	Unconfined Compressive Strength Index of Chemical-Grouted Soils	ASTM D4219
Tekutost	Slump of Portland Cement Concrete	ASTM C143
	Flow of Grout for Preplaced-Aggregate (Flow Cone Method)	ASTM C939
Doba tvrdnutí	Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance	ASTM C403
Bleeding a objemové změny	Change in Height at Early Ages of Cylindrical Specimens from Cementitious Mixtures	ASTM C827
Objemová hmotnost	Unit Weight, Yield, and Air Content of Concrete	ASTM C138
Únosnost	California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compactive Soils	ASTM D1883
Smyková pevnost	Unconsolidated Undrained Compressive Strength of Cohesive Soils in Triaxial Compression	ASTM D2850
	Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions	ASTM D3080
Odolnost vůči korozi	pH of Soil for Use in Corrosion Testing	ASTM G51
	Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method	ASTM G57
	Optimum SO <sub>3</sub> in Portland Cement	ASTM C563

Obecně se ztekucené zálivky dělí na vyhloubitelné a nevyhloubitelné. Předpokládá se, že pevnosti vyhloubitelných zálivek budou nízké, z důvodu možnosti zpětného vykopání materiálu, pokud by bylo potřeba se dostat zpět k inženýrským sítím [26]. Pro podmínky ČR bylo nutné provést optimalizaci možnosti ověřování směsí podle platných norem. Na základě optimalizace zahraničních a tuzemských norem byly pro ověřování směsí použity následující zkoušky:

- konzistence,
- doba tuhnutí a tvrdnutí,
- pevnost v tlaku,
- objemové změny.

## 4.1 KONZISTENCE

Tekutost je základní požadavek na samozhutnitelné zálivky. Je potřeba, aby směs vyplnila i ty nejméně přístupné prostory kolem inženýrských sítí. Z tohoto hlediska je tedy nutné, aby splňovala podmínky tekutosti. Při stanovení zkoušky tekutosti samozhutnitelné zálivky jsem vycházel z normy ČSN EN 12350-8 Zkoušení čerstvého betonu - Část 8: Samozhutnitelný beton - Zkouška sednutí-rozlítím [27]. Při ověřování směsí jsem se zaměřil na rozlité, které zapadá do kategorie SF2. Dané rozlité je vhodné z důvodu zajištění požadovaných podmínek tekutosti, při přiměřeném obsahu vody.

**Tabulka 4.2 Hodnoty pro zařazení dle sednutí-rozlítím [27]**

Třída	Rozlité [mm]
SF1	550 - 650
SF2	660 - 750
SF3	760 - 850

Dále existují ještě jiné možnosti, jak měřit konzistenci. Jako alternativní metody bych uvedl techniky popsané v normách ASTM International a to normu ASTM C143 - Standard Test Method for Slump Of Portland Cement Concrete [28] a normu ASTM C939 - Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method) [29].

## 4.2 DOBA TUHNUTÍ A TVRDNUTÍ

Doba tuhnutí a tvrdnutí ztekucených zemin je poměrně dlouhá. Je to dáno vysokým vodním součinitelem. Z tohoto důvodu stojí konzistence, či tekutost směsi proti době tuhnutí. Čím vyšší vodní součinitel, tím vyšší rozlité, ale také delší doba tuhnutí. Je potřeba, aby tyto vlastnosti byly vyrovnány. Jelikož je potřebné rozlité dáno, je vhodné zkusit snížit vodní součinitel pomocí plastifikačních, superplastifikačních či jiných ztekucujících přísad. Tím může být dosaženo rychlejšího tuhnutí, potažmo tvrdnutí. Dále se předpokládá, že množství cementu taktéž ovlivní rychlosti tuhnutí a tvrdnutí. Větší množství cementu způsobuje rychlejší nárůst pevnosti a vyšší konečné pevnosti, což není většinou příliš žádoucí. Hlavní požadavek je, aby byla směs co nejdříve pochozí. Dle Adaska [26] by měl CLSM tuhnout v řádu hodin, uvádí se 1 – 5 hodin, což záleží na složení směsi.

### 4.3 PEVNOST V TLAKU

Pevnost v tlaku je další důležitou vlastností, avšak jak bylo zmíněno dříve, nemá dosahovat vysokých hodnot z důvodu možné zpětné vyhloubitelnosti zatvrdlé zálivky. Dle Adaska [26] by měla ztekucená zálivka dosahovat dlouhodobých pevností po 28 dnech od 0,20 MPa až po 1,38 MPa, což jsou vyšší pevnosti než má většina zhutněných, či stabilizovaných zemin. Ovšem tyto pevnosti nejsou závazné a záleží zde na možnosti využití. Jiná pevnost bude požadována do výkopů nacházejících se pod chodníky a jiná pod cesty. Dále je možnost využít ztekucené zeminy na jiné aplikace, kde by mohly být požadovány vysoké pevnosti, a nepředpokládalo by se, že by byla nutnost zeminu opětovně vykopat. Aby bylo možné zeminy znova vykopat pomocí ručních nástrojů, neměla by pevnost přesahovat 0,3 MPa [26].

### 4.4 OBJEMOVÉ ZMĚNY

Vzhledem k vysokému podílu vody se předpokládá, že bude docházet k objemovým změnám během tuhnutí a tvrdnutí. Tento proces by se měl redukovat na minimum.

V mé bakalářské práci [30] jsem zmínil, že k omezení objemových změn by mělo sloužit vápno, které se váže na jílové minerály. Díky tomuto procesu dojde k vysoušení zeminy, snížení citlivosti zeminy na vlhkost, zvýšení meze plasticity a přitom nedojde k zásadním změnám meze tekutosti. Pro to, aby celý proces stihl proběhnout, se doporučuje míchání vápna se zeminou 24 hodin před tím, než je tato směs míchána s dalšími složkami a vodou. Je také vhodné poznamenat, že se z důvodu velkého množství vody vyskytne možnost, že bude docházet k bleedingu. S tím souvisí i vypařování vody, což by opět mohlo způsobit mírné smrštění [26].

## 5 STABILIZACE ZEMIN

Stabilizace zemin je pouze jednou z několika technik dostupných geotechnickým inženýrům a její přednost pro jakékoliv okolnosti by měla být provedena až po porovnání s jinými technikami. Důraz by při výběru technik měl být kladen především na technické a ekonomické parametry. Dvě nejpoužívanější chemické stabilizační techniky jsou stabilizace cementem a vápnem.

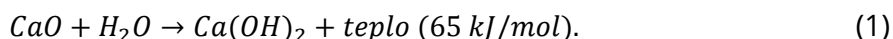
Stabilizovaná zemina je obvykle kompozitní materiál, který je výsledkem sloučení a optimalizace vlastností jednotlivých složek materiálu [31]. Pokud jde o stabilizaci zeminy za použití různých přísad, jako je cement a vápno, tak bylo provedeno mnoho studií [32]. Stabilizace zeminy s použitím vápna nebo cementu byla z velké části využívána ke zlepšení mechanických vlastností různých zemin pro stavebně inženýrské funkce [33].

### 5.1 STABILIZACE ZEMIN POMOCÍ VÁPNA

Vápno poskytuje ekonomický způsob stabilizace zeminy. Úprava vápnem způsobuje zvýšení pevnosti vyvolané výměnnou kationtů spíše než tvrdnoucí účinek vyvolaný pucolánovou reakcí [33]. Při úpravě půdy, se během flokulace jílovitých částic transformují jílové minerály z destičkového tvaru do jehličkového tvaru podobného jako ve struktuře kovů. Jílové půdy se po přidání vápna vysuší a stanou se méně náchylnými ke změnám způsobeným obsahem vody [34]. Stabilizace vápnem může způsobit pucolánové reakce, při kterých pucolánové materiály reagují s vápnem v přítomnosti vody, za vzniku hydraulických sloučenin [33, 35]. Efekt může být dosažen buď páleným vápnem  $\text{CaO}$ , nebo hydratovaným vápnem  $\text{Ca(OH)}_2$ . Vápenná kaše může být také použita v podmínkách suché půdy, kde může být požadována voda k dosažení efektivního zhutnění [36]. Pálené vápno je nejčastěji používaným vápnem. Výhody páleného vápna ve srovnání s hydratovaným vápnem jsou následující [34]:

- vyšší dostupný obsah volného vápna na jednotku hmotnosti,
- vyšší objemová hmotnost než u hydratovaného vápna (je zapotřebí méně místa) a menší prašnost,

- generuje teplo, které urychluje nárůst pevností a velké snížení obsahu vlhkosti podle níže uvedené (1) reakční rovnice:



Pálené vápno, při míchání s mokrou půdou, okamžitě reaguje s vodou z okolní půdy v množství až 32 % své vlastní hmotnosti za vzniku hydratovaného vápna. Generované teplo, doprovázené touto reakcí, dále způsobí ztrátu vody v důsledku odpařování, což následně vede ke zvýšení meze plasticity půdy, tj. k vysychání a absorpci [33, 35]. Sherwood [33] zkoumal snížení plasticity zeminy způsobené v první řadě výměnou kationtů. Během výměny jsou kationty sodíku a vodíku nahrazeny ionty vápníku, kvůli kterým má jílový minerál větší afinitu k vodě. Dokonce i v půdách (např. vápenité půdy), kde je jíl nasycen vápenatými ionty, může být pomocí přidání vápna zvýšeno pH a tím i navýšená výměnná kapacita. Podobný účinek má i cement. Reakce vápna a cementu s mokkými jílovými minerály má za následek zvýšení pH, které umožňuje rozpustnost křemičitých a hlinitých sloučenin. Tyto sloučeniny reagují s vápníkem za vzniku kalcium-silikátů a kalcium-alumino-hydrátů, což jsou produkty podobné těm v cementové pastě. Přírodní pucolánové materiály, které obsahují silikáty a alumináty (např. jílovité minerály, úletový popílek, popílek ze spalování práškovitého uhlí, vysokopecní struska), mají velký potenciál v reakci s vápnem [33].

Technologie stabilizace vápnem se většinou používá v geotechnických a environmentálních aplikacích. Některé aplikace zahrnují zapouzdření kontaminantů, provedení zásypu (např. mokré soudržné zeminy), podloží dálnice, stabilizace svahů a zlepšování základů, jako za použití vápna nebo zemních pilířů stabilizovaných vápnem [37]. Nicméně přítomnost síranů a organických materiálů může omezovat proces stabilizace vápna. Síran (např. sádra) reaguje s vápnem a bobtná, což může mít vliv na pevnost půdy.

Bell [38] studoval přidavek vápna na montmorillonitové jíly a zjistil, že dochází k rychlému počátečnímu zvýšení pevnosti v tlaku i při malých přírůstcích vápna. Totéž platí pro kaolinit a velmi jemný křemen. Optimální množství vápna pro montmorillonit bylo asi 4 %. U kaolinitu se optimální množství vápna pohybovalo mezi 4 % a 6 %, zatímco u křemene mezi 4 % a 8 %. Bylo jasně prokázáno, že u montmorillonitu může

mít nízké množství vápna větší vliv na maximální sílu v porovnání s vyšším obsahem. Pevnost se nezvyšovala lineárně s obsahem vápna, ale dokonce byla snížena s nadměrným přidáním vápna. Zrání bylo jedním z hlavních důležitých proměnných, které ovlivňují pevnost zeminy stabilizované vápnem z hlediska funkce času, teploty a relativní vlhkosti. Bell [38] také dospěl k závěru, že během prvních 7 dnů zrání se síla rychle zvětšuje a poté je již nárůst pozvolnější více či méně konstantní rychlostí.

## **5.2 STABILIZACE ZEMIN POMOCÍ CEMENTU**

Cement je nejstarší stabilizující pojivo od vynálezu technologie stabilizace zeminy v šedesátých letech. Může se považovat za primární stabilizátor nebo hydraulické pojivo, protože může být použit samotný k dosažení požadovaného stabilizačního účinku [33, 35]. Reakce cementu není závislá na minerálech půdy a klíčovou roli je jeho reakce s vodou, která může být dostupná v jakékoliv zemině [35]. To může být důvod, proč se cement používá k stabilizaci široké škály zemin. Na trhu je k dispozici mnoho druhů cementu. Jedná se o obyčejný portlandský cement CEM I, portlandský směsný cement CEM II, vysokopecní cement CEM III, cement s vysokou odolností proti sulfátům, hlinitanový cement, a další. Obvykle výběr cementu závisí na typu půdy, která má být ošetřena, a na požadované konečné pevnosti [35].

Hydratační proces je děj, při kterém dochází k reakci cementu. Proces se spustí, když se cement smíchá s vodou a dalšími komponenty pro požadované použití, což vede k vytvrzovacím jevům. Tvrdnutí cementu uzavře půdu jako „lepidlo“, ale nezmění strukturu půdy [35]. Hydratační reakce probíhá pomalu z povrchu cementových zrn a střed zrna může zůstat nehydratovaný [33]. Hydratace cementu je komplexní proces s komplexní řadou neznámých chemických reakcí [39]. Tento proces však může být ovlivněn:

- přítomnosti cizích látek nebo nečistot,
- poměrem vody a cementu,
- teplotou během vytvrzování,
- přítomností přísad,
- specifickým povrchem směsi.

Konečný účinek na pokládku a zvýšení pevnosti stabilizované zeminy cementem se může měnit v závislosti na zmíněných faktorech. Proto je třeba při návrhu směsi zohlednit tuto skutečnost, aby bylo dosaženo požadované pevnosti.  $C_3S$  a  $C_2S$  jsou dva hlavní slínkové minerály obyčejného portlandského cementu, které jsou odpovědné za vývin pevností [35, 40]. Hydroxid vápenatý je dalším hydratačním produktem portlandského cementu, který dále reaguje s pucolánovými materiály dostupnými v stabilizované zemině za účelem aktivace těchto materiálu [33]. Normálně je množství použitého cementu malé, ale dostatečné pro zlepšení fyzikálně mechanických vlastností půdy a kationtové výměny jílu. Dle Sherwooda [33] mají půdy stabilizované cementem následující upravené vlastnosti:

- sníženou soudržnost (plasticita),
- menší objemové změny nebo stlačitelnosti,
- zvýšenou pevnost.

### **5.3 STABILIZACE ZEMIN POMOCÍ POPÍLKU**

Popílek je vedlejším produktem uhelných elektráren. Má slabé hydraulické vlastnosti ve srovnání s vápnem a cementem. Většina popílku patří mezi pucolány. Tyto pojiva nemohou samy o sobě dosáhnout požadovaného účinku. Nicméně v přítomnosti malého množství aktivátoru můžou chemicky reagovat za vzniku hydraulické sloučeniny, která přispívá ke zlepšení pevnosti měkké půdy [41]. Popílek je druhotný produkt, takže je snadno dostupný a levný. Jeho využití zároveň vede k ochraně životního prostředí. Existují dvě hlavní třídy popílku, třída C a třída F [41]. Popílků třídy C se vyrábějí převážně hnědého uhlí a mají dobré pucolánové vlastnosti díky vysokému obsahu volného  $CaO$ . Popílek třídy C z lignitu má nejvyšší obsah  $CaO$  (nad 30%), takže se chová jako hydraulické pojivo a nepotřebuje tudíž aktivátor [41]. Popílek třídy F se vyrábí spalováním převážně antracitu a černého uhlí. Má nízké pucolánové vlastnosti kvůli omezenému množství volného  $CaO$ , které je k dispozici pro vločkování jílovitých minerálů a vyžaduje proto přidání aktivátorů, jako je vápno nebo cement. Redukce bobtnání je v půdě ošetřené popílkem dosaženo spíše mechanickou vazbou než iontovou výměnou s jílovými minerály [42]. Stabilizace zemin pomocí popílku má však podle [43] následující omezení:



- půda, která má být stabilizována, musí mít méně vlhkosti, proto může být potřeba odvodnění,
- směs zeminy a popílku ošetřována pod bodem mrazu a pak s následným stykem s vodou je vysoce náchylná k popraskání a ztrátám pevnosti,
- obsah síry může ve směsi zeminy a popílku vytvářet expanzivní minerály, což snižuje dlouhodobou pevnost a trvanlivost.

## 6 ZTEKUCENÍ ZEMIN

Jelikož pro ztekucené zeminy je potřeba velkého množství vody, hledá se vhodný způsob, jak dané množství vody snížit, a přitom zachovat optimální konzistence. K tomu slouží ztekucovadla, plastifikační či superplastifikační přísady.

Jako ztekucování nazýváme úpravu viskozity materiálu tak, aby se dosáhlo co největší tekutosti při maximálním obsahu tuhých částic [44]. Jinak řečeno, aby bylo použito minimální množství vody. Vhodné plastifikační, superplastifikační či ztekucující přísady se volí podle konkrétního druhu zeminy. Tyto látky upravují viskozitu suspenze tak, aby se dosáhlo co nejlepší tekutosti, či zpracovatelnosti, při maximálním množství tuhé fáze.

Obor zkoumající tuto problematiku se nazývá reologie. Zabývá se deformacemi a tečením hmoty časově závislou na napětí. Tok je charakterizován smykovými parametry - napětím  $\tau$  a rychlostí  $\gamma$ . Viskozitu můžeme poté definovat jako [44]:

$$\varepsilon = \tau/\gamma \quad (2)$$

kde:  $\tau$  ... smykové napětí [Pa],  
 $\gamma$  ... smyková rychlost [ $s^{-1}$ ],  
 $\varepsilon$  ... viskozita [Pa·s].

Jak bylo zmíněno v mé bakalářské práci [30], tak vhodné ztekucující přísady pro problematiku této práce nalezneme v oborech zpracování betonu a keramiky.

Píščitá zemina by měla mít po přidání cementu podobné vlastnosti jako maltová směs. Z toho důvodu by mohlo být vhodné použít superplastifikační přísady z oboru výroby betonových směsí.

Pro jemnozrnné zeminy by se mohly používat ztekucovadla, které se uplatňují v keramickém průmyslu. Ztekucovadla působí na jílové minerály, avšak při mísení s cementem mohou mít odlišný účinek. Zmiňovaný jev byl popsán například v mé bakalářské práci [30], kde vodní sklo spíše způsobilo urychlení tuhnutí cementového tmele, místo ztekucení celé směsi s jemnozrnnou zeminou.

O účincích ztekucovadel, jako například vodního skla, jsme se přesvědčili v bakalářské práci [30], kde bylo vodní sklo přidáno do jemnozrnné zeminy s přídatkem 1,5 % vápna a 4 % cementu. V tomto pokusu vodní sklo reagovalo spíše s cementem a způsobovalo urychlení tuhnutí. Avšak při správné dávce by mohlo vodní sklo ztekutit

zeminu a následně za určitý čas urychlit její tuhnutí. Díky tomuto zjištění nedoporučuji používání ztekucovadel a zaměřil se na plastifikační či superplastifikační přísady na bázi polykarboxylátů.

Polykarboxyláty (PC) patří mezi nejmodernější superplastifikátory, které fungují jak na principu sterického, tak na principu elektrostatického odpuzování. Skládají se ze tří částí: polyethylenové páteře plastifikátoru, naroubovaných polyoxyethylenových skupin a karboxylových skupin. Základní vlastnosti, které ovlivňují vlastnosti PC, jsou délka hlavního řetězce, délka bočního řetězce, stupeň polymerace a chemické složení funkčních skupin. Upravením jednotlivých částí řetězce tak lze vytvořit polykarboxylát podle potřeb. Při dávkování v desetinách % lze dosáhnout až pod hodnotu vodního součinitele  $w = 0,25$ . [45]

## 7 CÍL PRÁCE

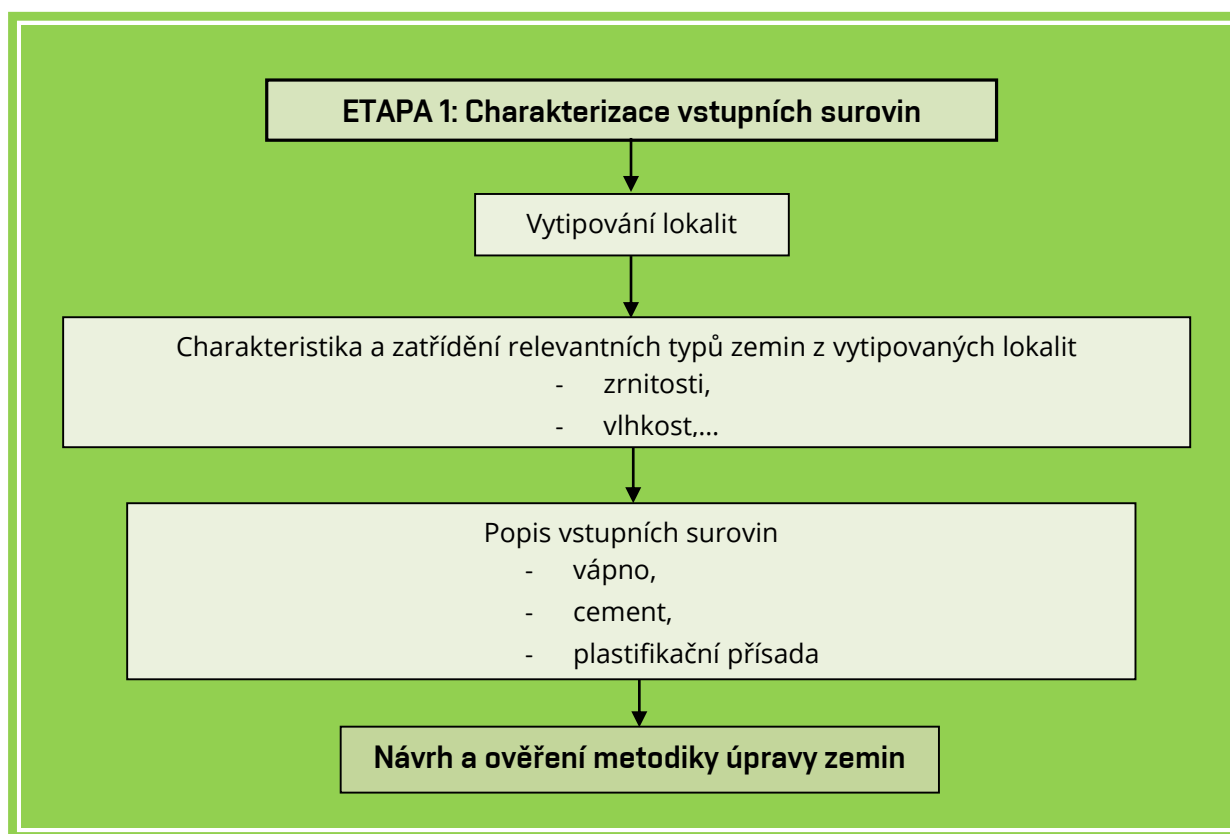
V současné době se zemní práce inženýrských sítí provádějí ukládáním sypkých zemin a jejich následným hutněním. Méně vhodné zeminy jsou odváženy na skládky. Možnosti úpravy zemin pomocí vhodných pojiv a ztekucujících přísad může vést k vývoji nové technologie ztekucení zeminy.

Cílem diplomové práce je navrhnout vhodnou technologii úpravy zemin tak, aby bylo možné jejich zpětné využití ve ztekucené formě. Výsledná směs bude splňovat optimální reologické a fyzikálně-mechanické parametry. Pro splnění cíle bude potřeba zhodnotit situaci využitelnosti zemin na území ČR a popsat možné technologie úpravy zemin. Dále bude nutno zhodnotit a ověřit v současnosti známé druhy stabilizačních přípravků a jejich vliv na stabilizaci zemin. Následně bude potřeba zhodnotit a ověřit různé druhy plastifikačních a ztekucujících přísad. V závěru si práce klade za cíl vybrání optimálních směsí a zhodnocení dosažených výsledků po technické a ekonomické stránce.

## 8 METODIKA PRÁCE

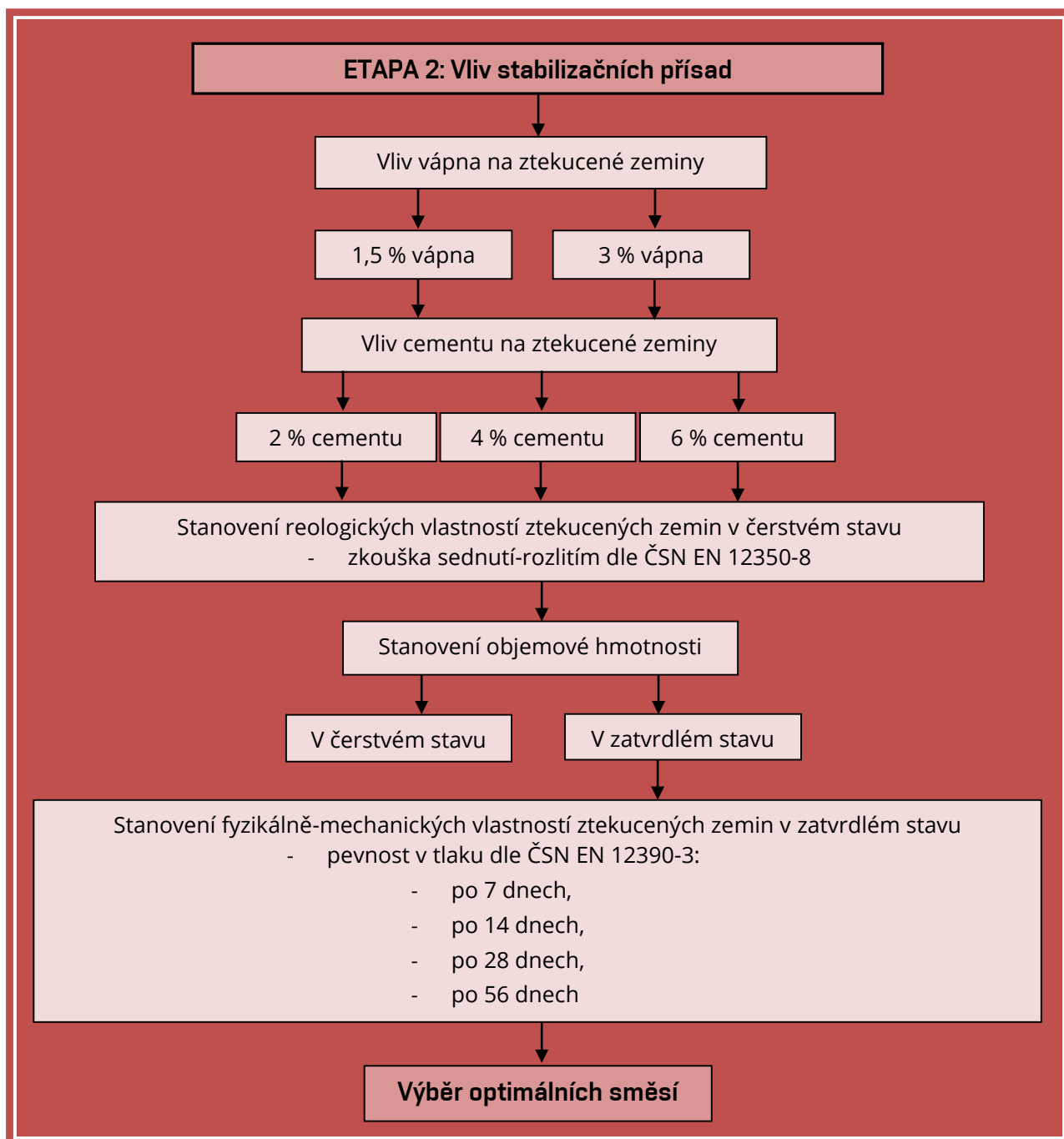
Ztekucené a stabilizované zeminy lze použít jako samozhutnitelné zálivky. Těmito zálivkami lze nahradit určité aplikace pískového lože, používaného na obsyp inženýrských sítí. Samozhutnitelné zálivky mají výhodu ve využití vykopané zeminy, která by jinak skončila na skládkách, absence nutnosti hutnění směsi a ušetření za dovoz písku. Princip závisí na smíchání vykopané zeminy s vodou, určitým množstvím pojiva a ztekucující přísadou.

V první etapě se charakterizují vstupní suroviny. Dle geologické mapy se vytipují oblasti, ve kterých by se měly nacházet zeminy písčité a sprašové. Tyto dvě zeminy se dále přesněji popíší a určí se jejich vlastnosti. Následně se popíší pojivové složky směsi a plastifikační přísady.

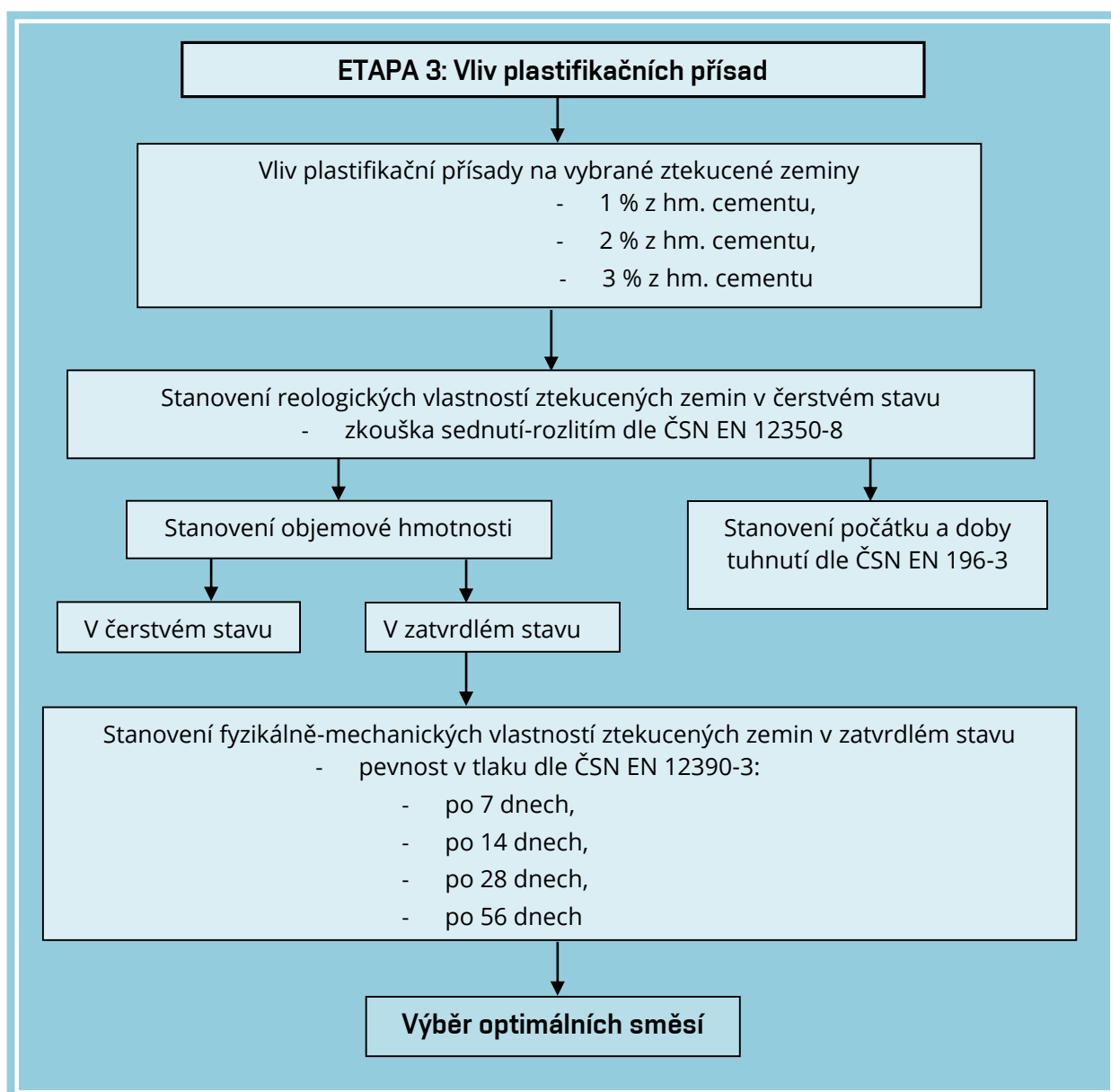


Druhá etapa bude zaměřena na vliv stabilizačních přísad na ztekucené zeminy. Postupně budou ověřovány kombinace směsí s 1,5 % a 3 % vápna v kombinaci s příměsí 2 %, 4 % a 6 % cementu. Na každé směsi se v čerstvém stavu stanoví jejich reologické

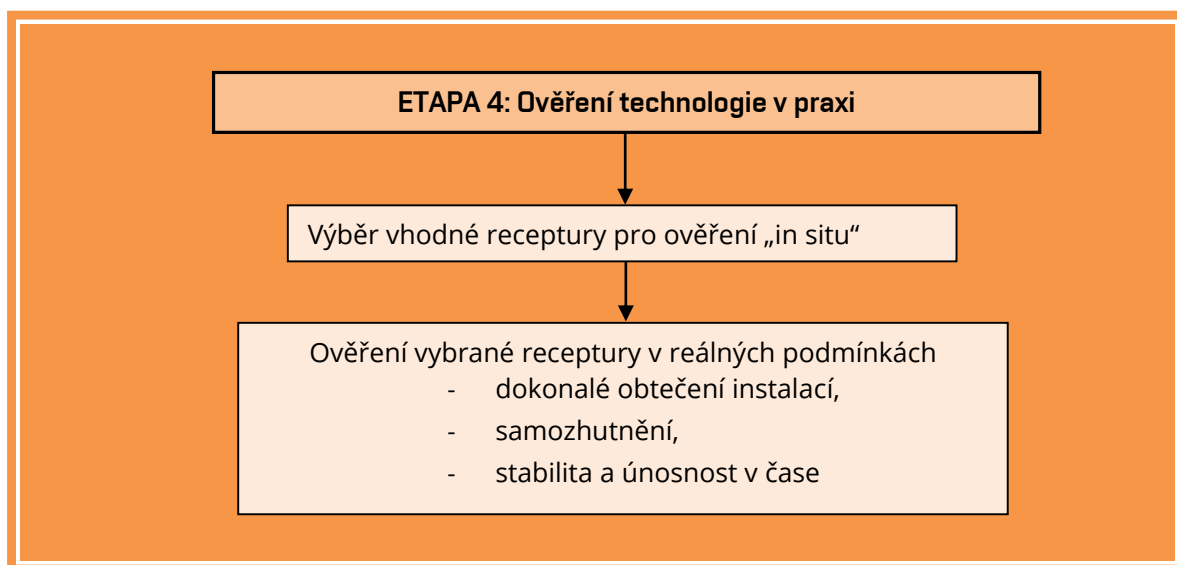
vlastnosti za pomoci zkoušky sednutí-rozlítím dle ČSN EN 12350-8 [27]. Následně se stanoví objemové hmotnosti v čerstvém a v zatvrdlém stavu. Dále se určí, jaký vliv mají jednotlivé složky na pevnosti v tlaku dle ČSN EN 12390-3 [49] po 7, 14, 28 a 56 dnech. Tyto doby zrání nám definují, jestli materiál dosahuje požadovaných raných pevností a zda například nedegraduje v čase. Na závěr druhé etapy se určí výběr optimálních směsí, na kterých se bude zkoumat vliv plastifikačních přísad.



Ve třetí etapě se ověří vliv tří plastifikačních přísad na výsledné vlastnosti vybraných směsí. Ověří se vhodnost jejich použití a vliv množství přísady na vlastnosti ztekucených zemin nejen v čerstvém stavu, ale také v zatvrdlém stavu. Opět se bude zkoumat reologie pomocí zkoušky sednutí-rozlítím dle ČSN EN 12350-8 [27], objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku dle ČSN EN 12390-3 [49] po 7, 14, 28 a 56 dnech. Dále se na směsích stanoví počátek a doba tuhnutí dle ČSN EN 196-3 [48].



V poslední etapě se provede výběr vhodných receptur pro praktické ověření. Dále se ověří, zda směs dosahuje v reálných podmínkách požadovaných vlastností.





## 9 METODIKA ZKOUŠEK

V této kapitole budou popsány zkoušky pro specifikování vlastností použitých zemin. Pro zjištění vlastností zkoumaných směsí v čerstvém a zatvrdlém stavu je potřeba provést odpovídající zkoušky. Na čerstvých směsích se bude provádět zkouška sednutí-rozlitím ČSN EN 12350-8 [27], které nám pomůže určit, zda je zemina samozhutnitelná a byla by schopna vyplnit všechny otvory ve výkopu. Dále se na vybraných směsích stanoví doby tuhnutí dle ČSN EN 196-3 [48]. Na zatvrdlé směsi se určuje pevnost v tlaku zkušebních těles dle ČSN EN 12390-3 [49], která nám pomůže určit odolnost a únosnost zkoumaného materiálu. U čerstvých i zatvrdlých směsí se stanoví objemová hmotnost.

### 9.1 ZRNITOST ZEMIN

Pro stanovení velikosti zrn lze použít různé zkoušky. Stanovení granulometrie nad 0,063 mm se provádí síťovým rozbořem plavením s následným síťováním zbytku, který zůstane na síti 0,063 mm. Stanovení částic menších než 0,063 mm se provádí sedimentačním rozbořem podle Andersena nebo metodou použití hustoměru podle Sasagrendeho. Nejmodernější metodou stanovení zrnitosti je laserová analýza.[46]

Podle charakteru křivky zrnitosti lze usuzovat vlastnosti zeminy. Rozhodujícím kvalitativním znakem nesoudržných zemin je číslo nestejnozrnitosti  $C_U$ , které charakterizuje sklon střední části křivky zrnitosti a je definováno:

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (3)$$

kde:  $d_{10}$  ... velikost zrn při 10% propadu,

$d_{60}$  ... velikost zrn při 60% propadu.

Podle velikosti hodnoty  $C_U$  označujeme zeminu jako stejnozrnnou pro  $C_U < 5$ , středně nestejnozrnnou pro  $5 < C_U < 15$  a nestejnozrnnou pro  $C_U > 15$ . Stejnozrnná zemina není vhodná pro zakládání [47].

Číslo křivosti  $C_C$  charakterizuje přibližně tvar křivky zrnitosti a je definováno:

$$C_C = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}} \quad (4)$$

kde:  $d_{30}$  ... velikost zrn při 30% propadu.

Číslo křivosti  $C_c$  je pomocná hodnota v klasifikaci zemin. Zeminy s hodnotami  $C_c$  1 až 3 považujeme na dobře zrněné a mají plynulé křivky zrnitosti. Hodnoty nižší a vyšší patří zeminám s chybějícími frakcemi. [47]

## 9.2 PROVÁDĚNÍ ZKOUŠEK V ČERSTVÉM STAVU

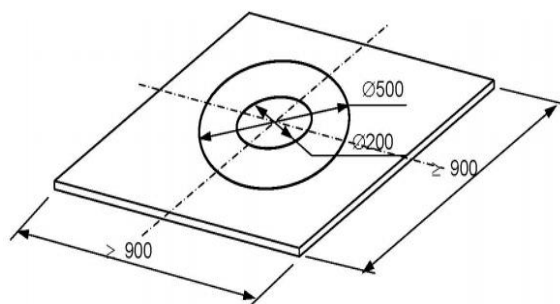
Tyto zkoušky se provádějí ihned po zamíchání vstupních surovin s vodou. Ukazují vlastnosti kompozitu zemin v čerstvém stavu.

### 9.2.1 Zkouška sednutí–rozlitím dle ČSN EN 12350 – 8

Tato zkouška je ukazatelem zejména pro zkoumání pohyblivosti, rychlosti tečení samozhutnitelných betonů a získání určité představy o viskozitě čerstvého betonu. Výsledky této zkoušky také vypovídají o schopnosti vyplňování prostoru SCC betonu. Zjišťuje se zde roztečení samothutnitelného betonu na podkladní desce. Na základě hodnoty rozlití je následně beton zařazen do jedné z kategorií [27].

#### Pomůcky

- Podkladní deska – deska (Obrázek 9.1) musí být z pevného, nerezavějícího a nenasákavého materiálu a její povrch musí být hladký a rovný. Její rozměry jsou minimálně  $900 \times 900$  mm a tloušťka alespoň 2 mm. Na desce je vyznačen středový kříž a dvě kružnice o průměru 200 a 500 mm. Kružnice o průměru 200 mm slouží ke správnému umístění Abramshova kužele (Obrázek 9.2) a kružnice s průměrem 500 mm pak ke stanovení času  $t_{500}$ , pro určení viskozity směsi.
- Abramsův kužel - normovaný Abramsův kužel daných rozměrů,
- pravítko - pravítko s délkou jednoho metru a stupnicí po 1 mm,
- stopky - stopky se schopností měřit čas na 0,1 s,
- nástroje pro plnění kuželu čerstvým betonem.



**Obrázek 9.1 Podkladní deska [27]**



**Obrázek 9.2 Pomůcky pro zkoušku sednutí-rozlitím dle ČSN EN 12350 - 8**

### **Postup zkoušky**

Nejprve se navlhčí podkladní deska, Abramsův kužel a nástroje použité pro plnění kužele směsí. Následuje osazení Abramsova kužele klasickým způsobem na podkladní desku, na místo vyznačené kružnicí o průměru 200 mm. Následuje plnění kužele. To se provede najednou při jednom plnění bez jakéhokoliv hutnění. Po naplnění se kužel zvedne, zapnou se stopky a čerstvý beton se nechá roztéct po desce. Zdvih kuželu musí proběhnout nejpozději do třiceti sekund od jeho naplnění. V momentu, kdy se směs dostane na hranici kružnice s průměrem 500 mm, se zastaví stopky a zaznamená se

výsledek - čas  $t_{500}$ . Ve chvíli, kdy se zastavilo roztékání čerstvého betonu, se změří dva na sebe kolmé rozměry na rozteklém koláči a zaokrouhlí se na nejbližších celých 10 mm. Z těchto dvou hodnot se stanoví průměrná hodnota a SCC beton se zatřídí do jedné ze skupin. Podle času, který byl zaznamenán na stopkách, se určí skupina viskozity dané směsi.

### Vyhodnocení

Z naměřených hodnot průměru rozteklého koláče se vypočítá aritmetický průměr a dle hodnoty je daný beton zařazen do jedné z kategorií (Tabulka 9.1). V případě že se rozměry  $d_1$  a  $d_2$  liší o více než 50 mm, musí se zkouška provést znova.

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (5)$$

kde:  $d_1, d_2 \dots$  naměřené průměry rozteklého koláče [mm],

$d \dots$  průměr naměřených hodnot [mm].

**Tabulka 9.1 Hodnoty pro zařazení dle sednutí-rozlitím [27]**

Třída	Rozlití [mm]
SF1	550 - 650
SF2	660 - 750
SF3	760 - 850

Z časového údaje  $t_{500}$  naměřeného na ručních stopkách se poté usuzuje na třídu viskozity (Tabulka 9.2).

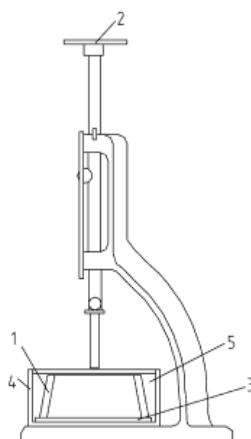
**Tabulka 9.2 Hodnoty pro určení třídy viskozity [27]**

Třída	$t_{500}$ [s]
VS1	$\leq 2$
VS2	$> 2$

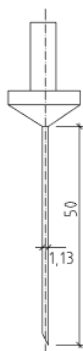
## 9.2.2 Stanovení dob tuhnutí dle ČSN EN 196-3

Stanovení počátku a doby tuhnutí [48] se obvykle provádí pomocí Vicatova přístroje s ocelovou jehlou (Obrázek 9.3). Ovšem u ztekucených zemin se po ověření této zkoušky narazilo na několik problémů. Ztekucené zeminy dosahují tak malých pevností, že jehla Vicatova přístroje (Obrázek 9.4) se zabořila dokonce i do vzorku v zatvrdlém stavu.

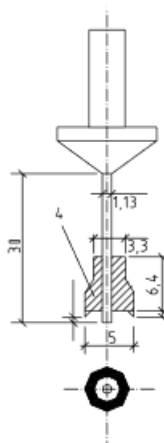
Po výpočtu bylo zjištěno, že jehla vyvozuje na materiál tlak 2,99 MPa, což je tlak až 10x větší než požadované pevnosti. Z tohoto důvodu se musel najít jiný způsob jak měřit dobu tuhnutí. V potaz přišla jehla Vicatova přístroje s nástavcem pro stanovení konce tuhnutí (Obrázek 9.5). Při uvažování, že tento nástavec má plochý konec, síla vyvinutá na materiál by měla být 0,15 MPa, což je síla odpovídající požadovaným pevnostem zatvrdlého kompozitu. Další odchylka od normového postupu byla absence vody v nádobě, do které se pokládá naplněný prstenec. Tento krok byl nutný z důvodu malého množství cementu, tudíž vzorek pod vodou netuhnul ani po několika dnech. Kvůli malému množství cementu a menším pevnostem vzorku byly také prodlouženy doby mezi jednotlivými vpichy na dobu 60 minut pro stanovení počátku doby tuhnutí (vzdálenost mezi destičkou a jehlou je  $(6 \pm 3)$  mm) a 30 minut mezi vpichy pro stanovení doby tuhnutí (od požadovaného průniku 0,5 mm změním na  $(2 \pm 2)$  mm).



**Obrázek 9.3 Vicatův přístroj [48]**



**Obrázek 9.4 Jehla Vicatova přístroje pro stanovení počátku tuhnutí [48]**



**Obrázek 9.5 Jehla Vicatova přístroje s nástavcem pro stanovení konce tuhnutí [48]**

### **Pomůcky**

- Vicatův přístroj s ocelovou jehlou a kruhovým nástavcem pro stanovení konce doby tuhnutí.
- Vicatův prstenec z tvrzené pryže.

### **Postup zkoušky**

Vicatův přístroj se nastaví do nulové polohy (hrot jehly se spustí na podkladní skleněnou destičku, stupnice se vynuluje). Následně se jehla zvedne. Vicatův prstenec se naplní směsí a povrch se zarovná. Naplněný Vicatův prstenec se vloží do zkušebního zařízení, jehla se zajistí v takové poloze, aby se hrotem dotýkala povrchu směsi. Po uvolnění jehla začne vnikat do zkoumaného vzorku a nejpozději do 30 vteřin se odečte hloubka vniknutí.

### **Vyhodnocení**

- Odečtená hodnota, která udává vzdálenost mezi hrotem jehly a skleněnou destičkou se zapíše spolu s dobou, která uplynula od smíchání cementu s vodou (nulový čas).
- Počátek doby tuhnutí se uvádí na stejném vzorku po 60 minutách na vhodných místech.
- Počátkem tuhnutí se rozumí doba, která uplyne od nulového času až do okamžiku, kdy vzdálenost mezi jehlou a destičkou činí  $(6 \pm 3)$  mm.

- Koncem tuhnutí se rozumí doba, která uplyne od nulového času až po okamžik, kdy jehla pronikne do směsi jen do hloubky 0,5 mm.

### 9.3 PROVÁDĚNÍ ZKOUŠEK V ZATVRDLÉM STAVU

Tyto zkoušky se provádějí po zatvrdnutí směsi. Ukazují vlastnosti kompozitu zemin v zatvrdlém stavu. Zkoušky na zatvrdlých směsích se ve většině případů prováděly po 7, 14, 28 a 56 dnech.

#### 9.3.1 Pevnost v tlaku zkušebních těles dle ČSN EN 12390-3

Při zkoušení pevnost v tlaku zkušebních těles [49] jsou zkušební vzorky zatěžovány až do porušení ve zkušebním zařízení.

##### Pomůcky

- zkušební tělesa o rozměrech 100×100×100 mm,
- zkušební lis (Obrázek 9.6),
- posuvné měřítko.



Obrázek 9.6 Zkušební lis

##### Postup zkoušky

Před vložením tělesa do zkušebního lisu se těleso zbaví jakéhokoliv nepevně uchyceného materiálu z povrchu dotkových ploch. Zkušební tělesa se osadí tak, aby směr zatěžování byl kolmý ke směru hutnění a ukládání a byla ve středu spodní

tlačené desky. Plynule se zatěžuje a zaznamená se největší dosažené zatížení. Následně se vypočítají pevnosti v tlaku jednotlivých vzorků a stanoví se jejich průměrná hodnota.

### **Vyhodnocení**

Z naměřených hodnot se vypočítá krychelná pevnost v tlaku materiálu, která je rovna podílu zatěžovací síly, potřebné pro porušení vzorku a zatěžované ploše.

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (6)$$

kde:  $f_c$  ... krychelná pevnost v tlaku [MPa],

$F$  ... síla potřebná pro porušení vzorku [kN],

$A$  ... zatěžovaná plocha [mm].

### **9.3.2 Smrštění**

Smršťování je proces, během kterého dochází ke zmenšování objemu vzorku způsobené ztrátou vody. Určení smrštění může být provedeno dle ČSN 72 1019 – Laboratorní stanovení smršťování zemin [50]. Tato norma určuje způsob laboratorního stanovení objemového smršťování soudržných zemin. Platí pro vyšetřování zemin ke stavebním účelům a vztahuje se na všechny jemnozrné soudržné zeminy v přirozeném uložení, zhutněné nebo laboratorně připravené s jednoznačně definovaným počátečním stavem.

Zásadně se stanovuje objemové smrštění zemin, avšak v odůvodněných případech se může stanovit i délkové smršťování odvozením z veličin změřených při stanovení objemového smršťování. Z důvodu odstoje vody se u vzorků stanovovalo délkové smrštění.

### **Postup zkoušky**

Smrštění se stanoví jako délková změna vztažena k určitému počátečnímu stavu. Jednotka je vyjádřena v procentech. Stanovení nabývání a smrštění směsi je doprovázeno vlivem vysychání. Měří se délkové změny v počátečním stádiu tuhnutí a tvrdnutí směsi. Při určení smrštění se nejedná o deformace způsobené vlivem mechanického zatížení.



## Vyhodnocení

Z každého provedení měření se stanoví hodnota smrštění a provede se přepočet na procentuální hodnotu. Výsledky hodnot smrštění jsou dány aritmetickým průměrem hodnot smrštění všech souběžných vzorků.

$$S_{sl} = \frac{a - a_i}{a} \quad (7)$$

kde:  $S_{sl}$  ... délkové (lineární) smrštění [%],

$a$  ... původní rozměr [m],

$a_i$  ... nový rozměr [m].

## 10 ETAPA 1 - CHARAKTERIZACE VSTUPNÍCH SUROVIN

V této kapitole budou blíže popsány vstupní suroviny, které byly použity zkušební vzorky praktické části práce.

### 10.1 ZEMINY

Zemina je hlavní složka výsledné ztekucené zálivky. Její vlastnosti určují výslednou konzistenci a pevnost kompozitu. Jak bylo zmíněno v kapitole 3.1, bude se zkoumat ztekucení a stabilizace zeminy sprašové a písčité.

#### 10.1.1 Jílovitá zemina

U zeminy vykopané v oblasti Brno - Medlánky se předpokládalo, že bude sprašová. Po detailním průzkumu se zjistilo, že se podle normy [22] jedná přesněji o písčité jílo (saCl). Pro zjednodušení bude zemina nazývána jako jílovitá. Z křivky zrnitosti (Obrázek 10.1) lze vyčíst, že skoro 70 % hmotnosti mělo menší zrna než 0,063 mm, což je hranice jemnozrnné zeminy.



**Obrázek 10.1 Křivka zrnitosti - jílovitá zemina**

Dále podle vlastností přehledně popsaných v Tabulka 10.1 lze vyčíst, že zemina dosahovala meze tekutosti 38 % a meze plasticity 21,6 %. Číslo plasticity mělo hodnotu 16,4 %. Dle křivky zrnitosti lze také určit, že se jedná o nepropustnou zeminu. Číslo nestejnozrnatosti udává, že se jedná o nestejnozrnnou zeminu a číslo křivosti

určuje, že zemina není dobře zrněná, nemá tudíž plynulou křivku zrnitosti. Vlhkost zeminy byla 19,7 %. Z důvodu zachování vlhkosti byla zemina uchovávána v plastových pytlích.

**Tabulka 10.1 Vlastnosti jílovité zeminy**

Název		písčítý jíl
Symbol		saCl
Podíl frakcí [%]	f (0-0,063 mm)	69,53
	s (0,063-2,0 mm)	26,41
	g (2,0-63 mm)	4,06
Průměry	d <sub>10</sub>	0,0008
	d <sub>30</sub>	0,0008
	d <sub>60</sub>	0,0206
Mez tekutosti	w <sub>L</sub> [%]	38,0
Mez plasticity	w <sub>P</sub> [%]	21,6
Číslo plasticity	I <sub>P</sub> [%]	16,4
Vlhkost zeminy	w [%]	19,7
Stupeň konzistence	I <sub>C</sub> [-]	1,12
Číslo nestejnozrnitosti	C <sub>U</sub> [-]	25,30
Číslo křivosti	C <sub>C</sub> [-]	0,04
Propustnost z křivky zrnitosti	k [m·s <sup>-1</sup> ]	2,064·10 <sup>-9</sup>

### 10.1.2 Písčítá zemina

Druhá zemina byla dovezena z oblasti Brno - Černovice. Předpokládalo se, že zde bude zemina písčítá. Průzkum ukázal, že se dle [22] jedná o mírně jílovitý jemnozrný štěrkovitý hrubozrný písek (fgrCSa). Pro zjednodušení bude zemina nazývána jako písčítá. Na křivce zrnitosti (Obrázek 10.2) si lze všimnout, že oproti předchozí zemině (Obrázek 10.1) je zde více hrubé frakce a pouze necelých 10 % hmotnosti mělo menší zrna než 0,063 mm.



**Obrázek 10.2 Křivka zrnitosti - písčité zemina**

Tabulka 10.2 popisuje vlastnosti zkoumané zeminy. U písčitých zemin se neměří meze plasticity a tekutosti, z toho důvodu zde nejsou uvedeny [47]. Dle křivky zrnitosti lze určit, že se jedná o propustnou zeminu. Číslo nestejnozrnitosti udává, že se jedná o nestejnozrnnou zeminu a číslo křivosti určuje, že zemina není dobře zrněná, nemá tudíž plynulou křivku zrnitosti. Vlhkost zeminy byla značně nižší než u jílovité zeminy, přesněji 4,2 %. Z důvodu zachování vlhkosti byla zemina uchovávána v plastových pytlích.

**Tabulka 10.2 Vlastnosti - písčité zemina**

Název		mírně jílovitý jemnozrnný štěrkovitý hrubozrnný písek
Symbol		fgrCSa
Podíl frakcí [%]	f (0-0,063 mm)	9,55
	s (0,063-2,0 mm)	58,70
	g (2,0-63 mm)	31,74
Průměry	d <sub>10</sub>	0,0741
	d <sub>30</sub>	0,6579
	d <sub>60</sub>	1,6254
Mez tekutosti	w <sub>L</sub> [%]	-
Mez plasticity	w <sub>P</sub> [%]	-
Číslo plasticity	I <sub>P</sub> [%]	0,0
Vlhkost zeminy	w [%]	4,2
Stupeň konzistence	I <sub>c</sub> [-]	0
Číslo nestejnozrnitosti	C <sub>u</sub> [-]	21,92

Číslo křivosti	$C_c [-]$	3,59
Propustnost z křivky zrnitosti	$k [m \cdot s^{-1}]$	$1,599 \cdot 10^{-4}$

## 10.2 CEMENT

Pro účel této práce byl vybrán portlandský směsný cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R ze závodu v Mokré od společnosti Českomoravský cement, a. s. Portlandský směsný cement se vyrábí semletím portlandského slínku, granulované vysokopeční strusky, vápence, síranu vápenatého a případně některých dalších látek. Měl by dosahovat středně rychlého nárůstu pevností, nízké počáteční pevnosti, středně vysoké konečné pevnosti a středně rychlého vývinu hydratačního tepla. Jeho použití je vhodné pro betony středních pevnostních tříd, betony se středním nárůstem pevnosti, prosté a vyztužené betony, průmyslové stavby a různé betonové výrobky.

Je složen z 65 – 79 % portlandského slínku, 21 – 35 % vysokopeční strusky a vápence, případně 0 – 5 % doplňujících složek, závisících na chemickém složení slínku.

Dle zkoušky [48] má cement průměrnou hodnotu normální konzistence 29,4 %, počátek doby tuhnutí 238 minut a konec tuhnutí 302 minut.

## 10.3 VÁPNO

Jako další stabilizující přísada byl vybrán hydroxid vápenatý SuperCalco CI 90 - S od firmy Carmeuse. Tento produkt má vysokou čistotu minimálně 90 %  $CaO + MgO$ , z toho obsah  $MgO$  je maximálně 5 % a  $SO_3$  maximálně 2 %. Dále dosahuje vysoké jemnosti a je zaručena objemová stálost. Vápenný hydrát má pH 12,4. Pro použití je bezpečnější než pálené vápno, jelikož již nevyvolává exotermickou reakci při smíchání s vodou, avšak stále je dráždivý a je potřeba ochranných pomůcek.

## 10.4 PLASTIFIKAČNÍ PŘÍSADA

Plastifikační přísady se používají do betonových směsí za účelem zlepšení reologických vlastností. Pro účel této práce byly na základě konzultace s odborníkem firmy Sika vybrány produkty Sika ViscoCrete – 1062, Sika ViscoCrete – 21 a Sika ViscoCrete – 4088.

#### **10.4.1 Sika ViscoCrete – 1062**

Tento vysoce účinný superplastifikátor je určen převážně pro transportbeton. Je vhodný pro betony s prodlouženou dobou zpracovatelnosti, tekuté betony a betony s konzistencí F3 – F6, tedy s rozlitím s poklepem 420 mm – 750 mm. Jeho výhody jsou především zlepšení dispergace a smáčení zrn cementu, snížení třecích sil mezi zrny cementu a kameniva, snížení množství záměsové vody a prodloužení dobu zpracovatelnosti při stejném vodním součiniteli v/c. Použití Sika ViscoCrete – 1062 způsobuje zvýšení počátečních i konečných pevností, zvýšení trvanlivosti betonu, snížení smrštění a dotvarování a zlepšení vzhledu povrchu betonu.

Z chemického hlediska se jedná o vodný roztok modifikovaných polykarboxylátů, hodnota pH je  $5,5 \pm 0,5$  a obsah alkálií je menší než 1 %.

Sika ViscoCrete – 1062 je doporučeno přidávat současně se záměsovou vodou a zamíchat do betonu před přidáním případných dalších přísad. Doba míchání je závislá na typu míchačky.

Doporučené dávkování se uvádí 0,2 – 2,0 % z hmotnosti cementu [52].

#### **10.4.2 Sika ViscoCrete – 21**

Tento vysoce účinný superplastifikátor s prodlouženou zpracovatelností je určen převážně pro prefabrikovanou výrobu a transportbeton. Je vhodný pro betony, u kterých je kladen důraz na vysokou počáteční pevnost, silou redukci vody, zlepšenou tekutost a dobu zpracovatelnosti do 60 minut. Díky svým vlastnostem je možné Sika ViscoCrete – 21 použít například pro výrobu prefabrikátů, beton s rychlým vývojem počátečních pevností, pro betony, které vyžadují rychlé odbednění, samozhutnitelné betony SCC, beton pro tunelové segmenty a transportbeton pro vnitřní tunelové ostění. Použití Sika ViscoCrete – 21 způsobuje výrazně vyšší počáteční pevnosti i za nižších teplot, kratší dobu odformování, extrémní snížení obsahu vody ve směsi a zlepšení chování betonu při smršťování a dotvarování.

Z chemického hlediska se jedná o vodný roztok modifikovaných polykarboxylátů, hodnota pH je  $4,5 \pm 0,5$  a obsah alkálií je menší než 0,5 %. Obsah sušiny je  $33,0 \pm 1,0$  %.

Sika ViscoCrete – 21 je doporučeno přidávat současně se záměsovou vodou. Doba míchání je závislá na typu a výkonu míchačky, avšak minimální doporučená doba míchání je 60 sekund.

Doporučené dávkování se udává pro střední hodnoty konzistence od 0,2 – 0,8 % z hmotnosti cementu. Pro beton s vyšší hodnotou konzistence, velmi nízkým vodním součinitelem a pro samozhutnitelné betony se doporučuje 0,7 – 1,5 % z hmotnosti cementu [52].

### **10.4.3 Sika ViscoCrete – 4088**

Sika ViscoCrete – 4088 je univerzální a vysoce účinný superplastifikátor určený převážně pro transportbeton s prodlouženou dobou zpracovatelnosti. Je vhodný pro transportbeton stupně konzistence S3 až S5 nebo F4 až F6, transportbeton s nízkou ztrátou konzistence a velmi dlouhou dobou zpracovatelnosti, transportbeton s dlouhou dobou dopravy, transportbeton s nízkým vodním součinitelem, či vysokopevnostní a hutněné betony. Použití Sika ViscoCrete – 4088 způsobuje zlepšení dispergace a smáčení zrn cementu, snižuje třecí síly mezi zrny cementu a kameniva, snižuje spotřebu záměsové vody a prodlužuje dobu zpracovatelnosti. U transportbetonu Sika ViscoCrete – 4088 umožňuje snížení vodního součinitele a tím zvýšení hutnosti a pevnosti, měkkou konzistenci a tím značné snížení nákladů na zpracování a zhutňování a při vyšších teplotách betonu zaručí pomalou ztrátu konzistence a tím pomůže dosáhnout delší doby zpracovatelnosti.

Z chemického hlediska se jedná o vodný roztok modifikovaných polykarboxylátů, hodnota pH je  $4,5 \pm 0,5$  a obsah alkálií je menší než 1 %.

Sika ViscoCrete – 4088 je doporučeno přidávat současně se záměsovou vodou a zamíchat do betonu před přidáním případných dalších přísad. Doba míchání je závislá na typu míchačky, avšak minimální doporučená doba míchání je 90 sekund.

Doporučené dávkování se udává pro střední hodnoty konzistence od 0,3 – 0,7 % z hmotnosti cementu. Pro beton s vyšší hodnotou konzistence, velmi nízkým vodním součinitelem a pro samozhutnitelné betony se doporučuje 0,6 – 1,4 % z hmotnosti cementu [52].

## 10.5 VODA

Voda plní funkci reologickou a hydratační. Hydratační funkcí podmiňuje hydrataci hydraulických pojiv, čímž vytváří tuhou strukturu. Voda bude kohoutková z Brněnské vodárenské soustavy, která je vzhledem k velmi dobrým hydrologickým podmínkám zásobována především podzemní vodou z Březové nad Svitavou a upravovanou vodou z úpravny vody Švařec. Ta upravuje vodu z Vírské přehradní nádrže, která se dopravuje přivaděčem Vírského oblastního vodovodu. Úpravna vody Švařec používá nejmodernější světové technologie, a to ozonizaci a filtraci přes granulované aktivní uhlí. Ve vodojemu Čebín jsou obě vody smíchány a desinfikovány jedním z nejmodernějších desinfekčních prostředků – chlórdioxidem (oxid chloričitý), který má řadu příznivějších účinků než chlor. Požadavky na kvalitu vody a její zkoušení jsou uvedeny v normě ČSN EN 1008 [51].



## 11 ETAPA 2 - VLIV STABILIZAČNÍCH PŘÍRAD

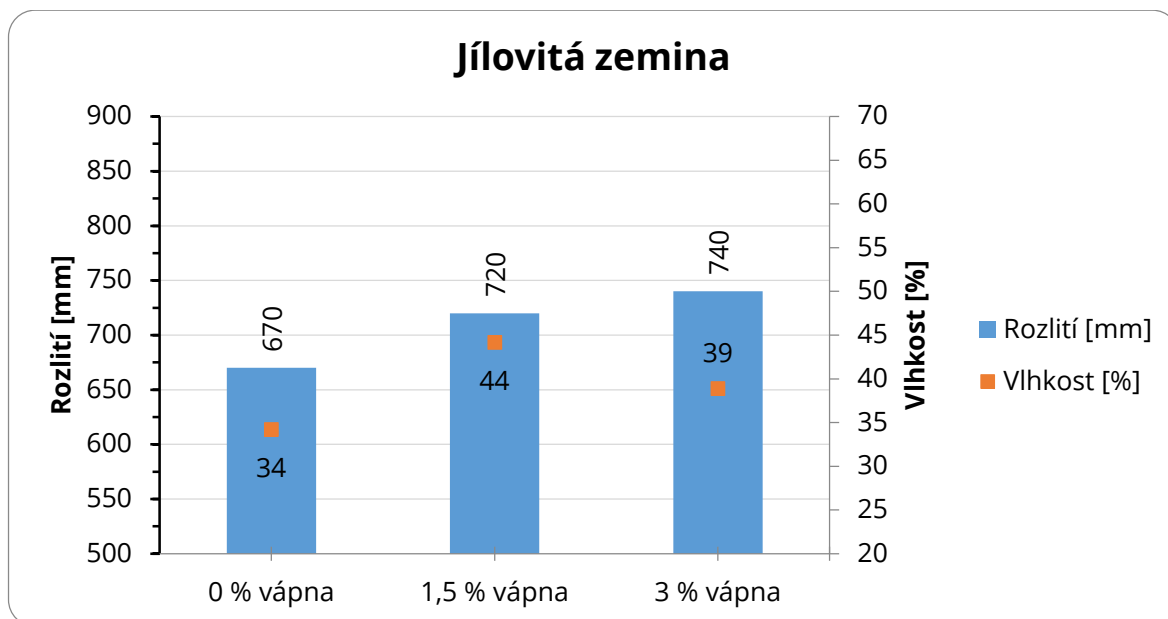
S ohledem na předešlé etapy byl vybrán soubor surovin, vhodných pro použití v dané technologii ztekucených zemin. Spolu tyto složky vytváří směs, která má specifické vlastnosti. Z fyzikálního hlediska se jedná o velmi složité prostředí, ve kterém vzájemně spolupůsobí tři fáze – pevná, kapalná a plynná. Jejich poměr ovlivňuje chování složek jako celku. Je vhodné poznamenat, že voda na rozdíl od zrn zeminy přenáší pouze tlak, nikoliv smykové napětí. Jestli chceme prozkoumat stav napjatosti směsi pod vlivem vlastního či vnějšího zatížení, musíme vždy znát vlastnosti složek působících jako celek. Tyto vlastnosti se nejčastěji určují pomocí laboratorních zkoušek, či pomocí zkoušek přímo v terénu.

Předpokládá se, že na zatvrdnutí směsi a konečné pevnosti budou mít největší vliv stabilizační přísady. Z důvodu velkého množství zkoušených směsí nebylo vápno přidáváno k zemině den předem (lepší stabilizace jílových minerálů), ale až před homogenizací s cementem.

V rámci výzkumu se u navržených směsí prováděla zkouška objemové hmotnosti v čerstvém a zatvrdlém stavu při přirozené vlhkosti, konzistence dle zkoušky sednutí-rozlítím a pevnost v tlaku po 7, 14, 28 a 56 dnech. Dále se u směsí stanovovalo smrštění způsobené vlivem poklesu vlhkosti směsi.

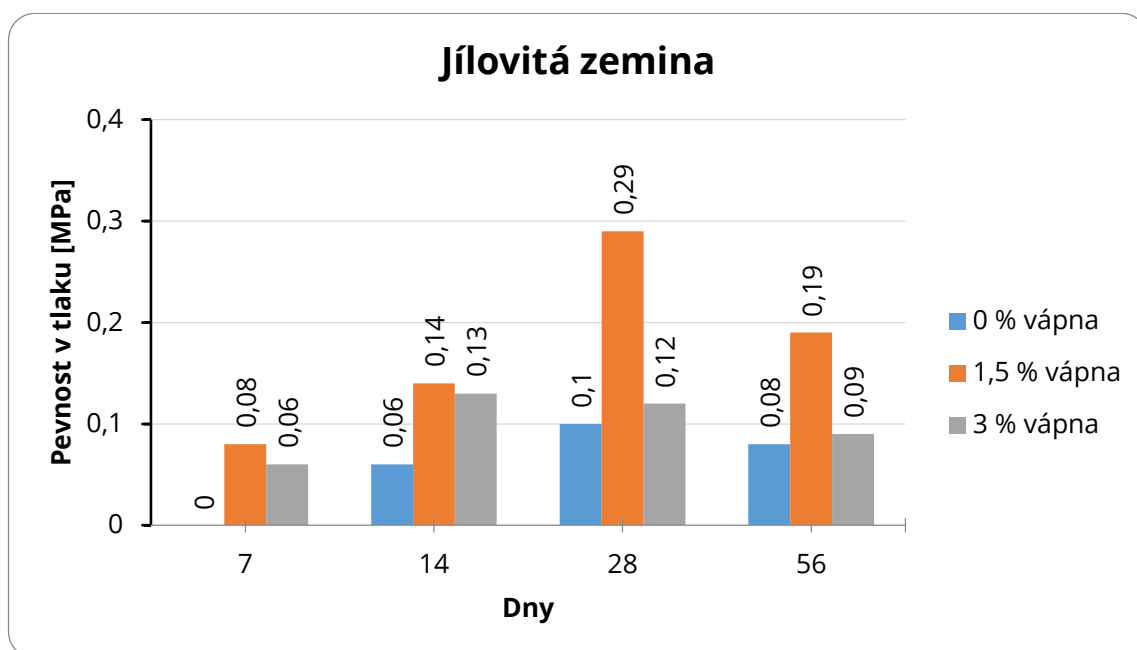
### 11.1 ZKOUŠENÍ SMĚSÍ JÍLOVITÉ ZEMINY S VÁPNEM

Na následujících obrázcích (Obrázek 11.1, Obrázek 11.2 a Obrázek 11.3) jsou uvedeny receptury, u kterých se zkoumal vliv vápna na jílovitou zeminu. Pro účel práce se zkoumaly vlivy 1,5 % a 3 % vápna. Předpokládá se, že vápno bude jílovitou zeminu stabilizovat, bude tvořit pevné vazby na molekulární úrovni a tím se bude vyvíjet pevnost vzorků v tlaku.



**Obrázek 11.1 Závislost rozlité na vlhkosti směsi na bázi jílovité zeminy a vápna**

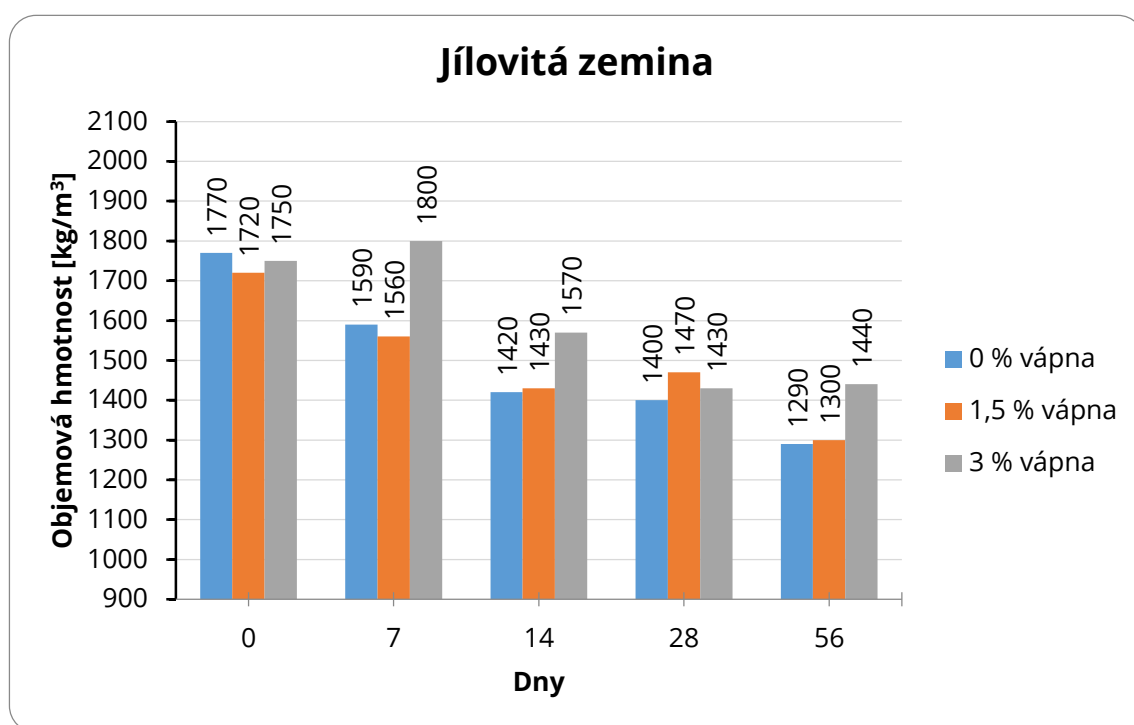
Obrázek 11.1 znázorňuje vliv vápna na rozlité směsi v závislosti na vlhkosti u jílovité zeminy. Z výsledků se zdá, že větší poměr vápna způsobuje lepší reologické směsi. Tento efekt se neočekával a mohl být způsoben rozdílnou dobou míchání. U jílovité zeminy je množství vody poměrně vysoké. To je způsobeno vlastnostmi jílu, jejich schopnosti vázat vodu s malými zrny zeminy. Rozlité obou směsí zapadá do kategorie sednutí-rozlitím SF2.



**Obrázek 11.2 Výsledky pevností v tlaku směsí na bázi jílovité zeminy a vápna**

Obrázek 11.2 uvádí pevnost v tlaku zkoušených vzorků po 7, 14, 28 a 56 dnech. Je patrné, že směsi s menším množstvím vápna dosahovaly oproti předpokladu větších pevností. Tento jev je pravděpodobně způsoben kvalitnější homogenizací, větším rozmělněním kousků jílovité zeminy míchané s 1,5 % vápna. Všechny vzorky nedosahují pevností 0,3 MPa, tudíž je lze považovat jako vyhovující z hlediska opětovného vykopání. Po sedmi dnech zemina bez vápna a cementu byla příliš zavlhlá na to, aby bylo možné stanovit pevnost v tlaku. Z tohoto důvodu zde není hodnota uvedena.

Je vhodné si povšimnout, že pevnost vzorků po 28 dnech klesá. To může být způsobeno velkým poklesem vlhkosti směsí. Snižování vlhkosti vzorků způsobovalo křehkost materiálu během manipulace a jakýkoli neopatrný kontakt způsobil drolení. Však zakomponování ztekucené zeminy do výkopu zaručí určitou vlhkost a vytvoří ochranu proti přílišnému vysoušení.



**Obrázek 11.3 Hodnoty objemové hmotnosti čerstvé a zatvrdlých směsí na bázi jílovité zeminy a vápna**

O změně objemových hmotností pojednává Obrázek 11.3. Vzorky s 3 % vápna dosahovaly vyšších objemových hmotností než vzorky s 1,5 %. Je zřejmé, že postupem

času je objemová hmotnost zmenšuje, což je způsobeno úbytkem vody ve vzorcích. S tím souvisí také hodnoty smrštění.

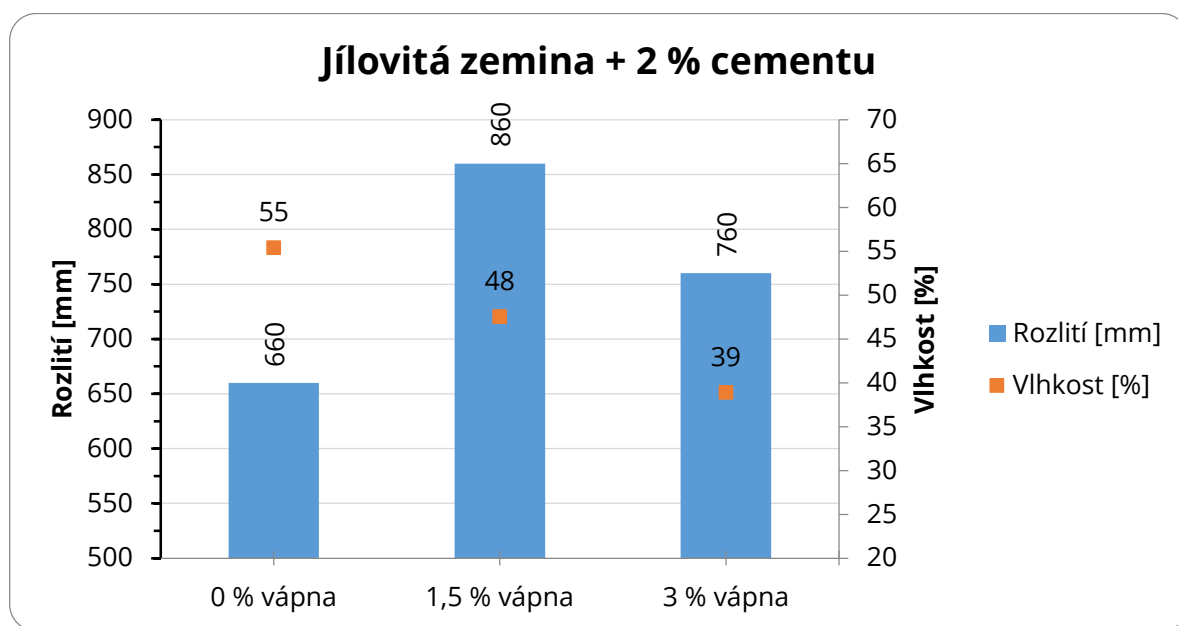
Tabulka 11.1 znázorňuje smrštění naměřené v daných časových intervalech. To se považuje jako druhotný efekt úbytku vlhkosti. Obecně platí, že vyšší vlhkost způsobí větší úbytek vody a tím také větší smrštění. Z tabulky je také zřejmé, že vyšší poměr vápna způsobil větší objemovou stálost a také větší množství dlouhodobě vázané vody ve vzorku. Velké vysychání také způsobilo na zkoušených kostkách praskliny.

**Tabulka 11.1 Hodnoty smrštění a vlhkosti směsí na bázi jílovité zeminy a vápna**

Směs	Smrštění [%]				Vlhkost [%]				
	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní	Při míchání	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní
Jílovitá zemina	0,0	10,2	12,3	13,0	34,2	29,8	17,2	13,3	8,1
Jílovitá zemina + 0 % cementu + 1,5 % vápna	2,5	3,3	7,9	7,2	44,2	31,4	16,9	7,8	1,9
Jílovitá zemina + 0 % cementu + 3 % vápna	1,8	1,1	1,6	1,9	38,9	33,4	21,2	12,2	9,5

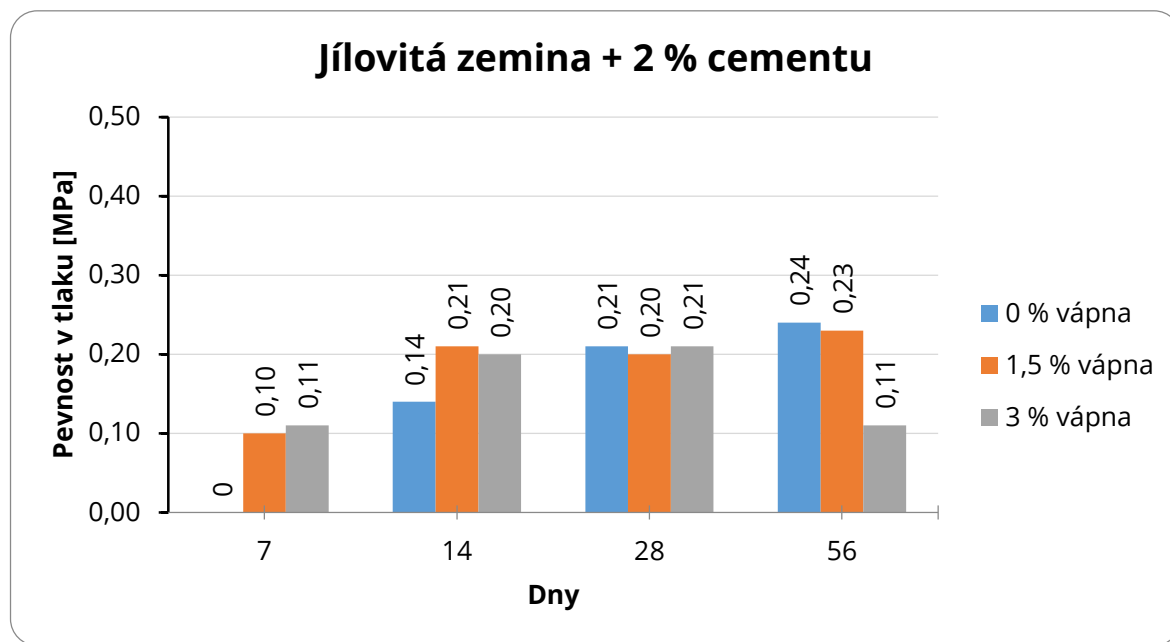
## 11.2 ZKOUŠENÍ SMĚSÍ JÍLOVITÉ ZEMINY S VÁPNEM A 2 % CEMENTU

Po zkoumání vlivu vápna na ztekucené zeminy se začalo zjišťovat, jaké vlastnosti ovlivní přidání cementu. Cement by měl utvářet pevnost materiálu a lepší kompaktnost.



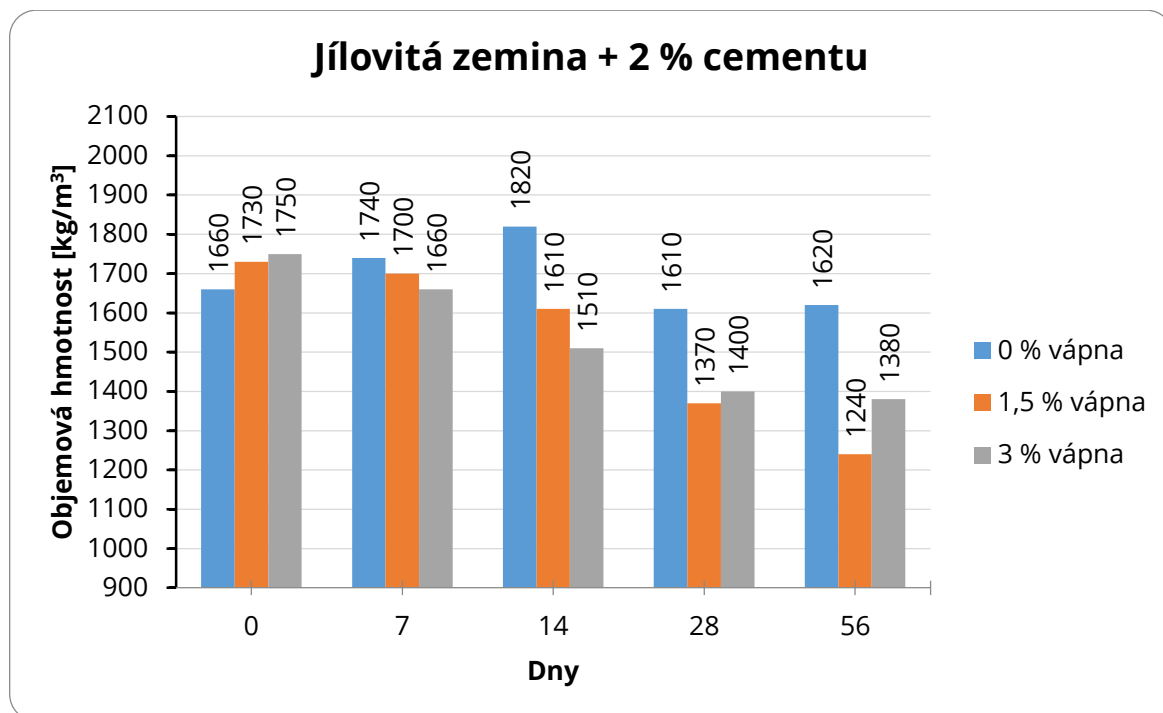
**Obrázek 11.4 Závislost rozlité na vlhkosti směsi na bázi jílovité zeminy, 2 % cementu a vápna**

Obrázek 11.4 zachycuje závislost rozlití na vlhkosti po přidání cementu do směsi. Je vhodné si povšimnout, že směs pouze s cementem dosahovala menšího rozlití při vyšším vodním součiniteli. Lze usuzovat, že přidání 2 % cementu do směsi mírně zlepšilo konzistenci oproti vzorkům, kde cement nebyl použit.



**Obrázek 11.5 Výsledky pevností v tlaku směsí na bázi jílovité zeminy, 2 % cementu a vápna**

U jílovité zeminy cement příliš nenavýšil pevnost v tlaku. Je zajímavé, že vzorky, kde nebylo použito vápno, po 7 dnech nezatvrdnuly, ale postupem času dosahovaly nejvyšších pevností v tlaku ze všech zkoušených směsí. Stejně jako u předešlých směsí docházelo ke drolení vzorků během manipulace.



**Obrázek 11.6** Hodnoty objemové hmotnosti čerstvých a zatvrdlých směsí na bázi jílovité zeminy, 2 % cementu a vápna

Také objemová hmotnost byla u vzorků bez použitého vápna po 7, 14, 28 a 56 dnech vyšší než při 1,5 % a 3 % vápna. To bylo nejspíše způsobeno vázanou vodou na jílové minerály ve vzorku.

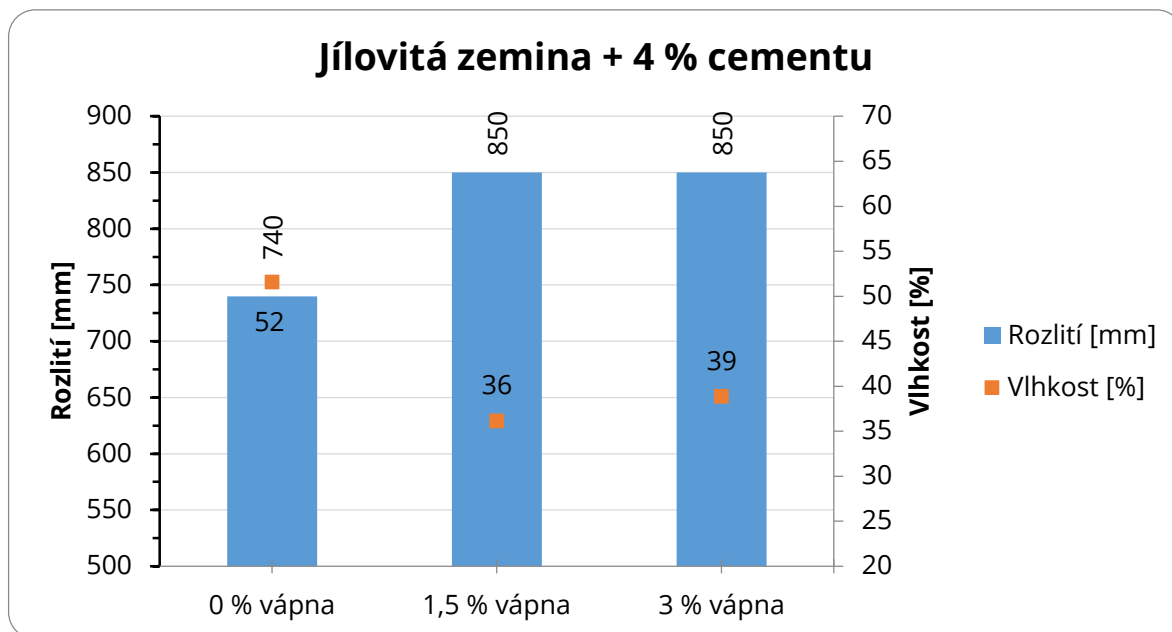
Z Tabulky 11.2 je jasné, že vápno plní v jílovitých zeminách stabilizační funkci. Při absenci vápna docházelo k velkým objemovým změnám. U všech vzorků se vyskytovaly praskliny způsobené vysycháním. Některé vzorky byly vlivem vysoké vlhkosti porostlé plísní, která však neměla vliv na konečné vlastnosti materiálu.

**Tabulka 11.2** Hodnoty smrštění a vlhkosti směsí na bázi jílovité zeminy, 2 % cementu a vápna

Směs	Smrštění [%]				Vlhkost [%]				
	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní	Při míchání	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní
Jílovitá zemina + 2 % cementu + 0 % vápna	0,0	9,5	11,1	12,6	55,4	45,7	37,0	22,2	18,8
Jílovitá zemina + 2 % cementu + 1,5 % vápna	2,3	5,9	5,2	4,2	47,6	34,8	21,9	14,7	7,6
Jílovitá zemina + 2 % cementu + 3 % vápna	1,0	0,5	2,3	1,9	38,9	28,3	21,2	10,4	9,1

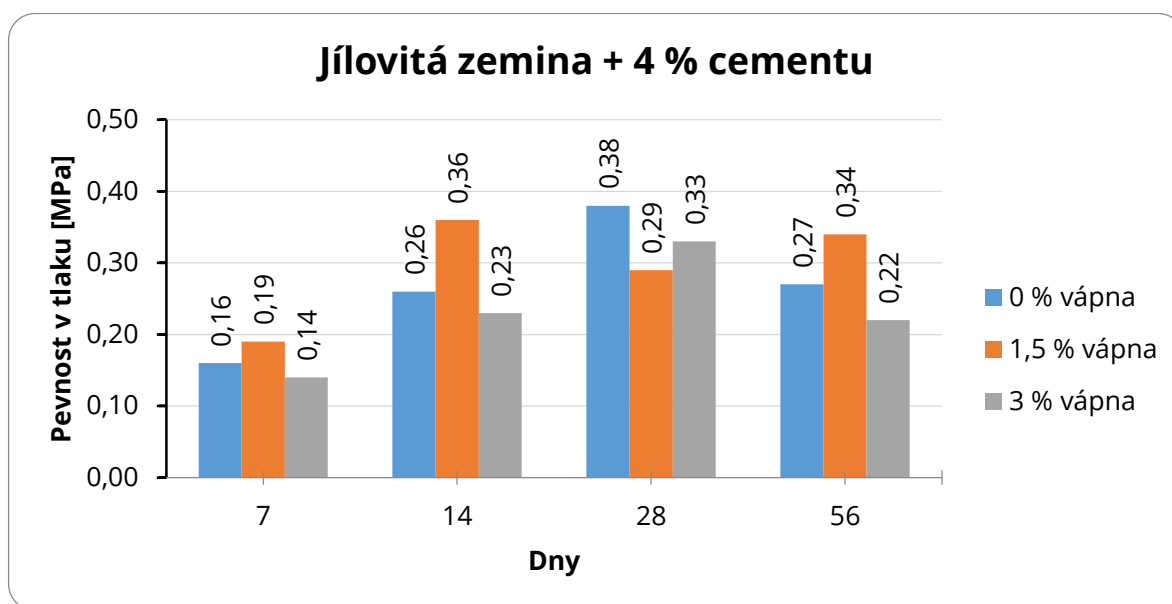
### 11.3 ZKOUŠENÍ SMĚSÍ JÍLOVITÉ ZEMINY S VÁPNEM A 4 % CEMENTU

V rámci další kapitoly se zkoumá vliv 4 % cementu na jílovitou zeminu.



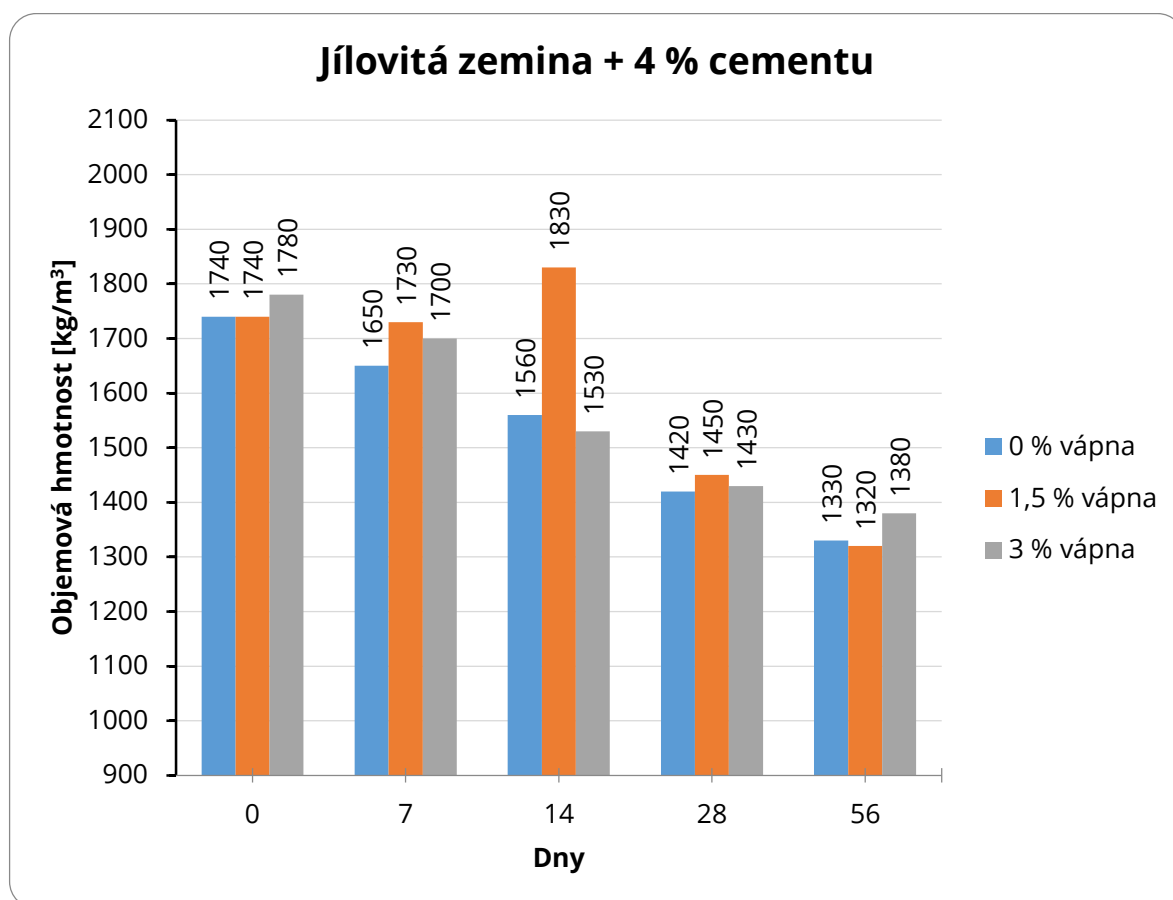
**Obrázek 11.7 Závislost rozlité na vlhkosti směsi na bázi jílovité zeminy, 4 % cementu a vápna**

Během zkoušky sednutí-rozlítím bylo zjištěno, že směsi, kde nebylo přimícháno vápno, dosahovaly menšího rozlité, než směsi s vápnem. Obecně se zdá, že kombinace 4 % cementu a vápna způsobuje větší rozlité za nižší vlhkosti. Dále bylo zjištěno, že 4 % cementu zvyšují rozlité směsi, oproti vzorkům, kde byly použity pouze 2 % cementu.



**Obrázek 11.8 Výsledky pevností v tlaku směsí na bázi jílovité zeminy, 4 % cementu a vápna**

Větší množství cementu podle očekávání způsobilo nárůst pevnosti. Dále se jeví, že u zkoušení po 56 dnech nastal drobný pokles pevnosti u vzorků jen se 4 % cementu a vzorků se 4 % cementu a 3 % vápna. Tento jev může být způsoben poklesem vlhkosti u vzorků. Je požadováno, aby pevnosti po 28 dnech nepřesáhly 0,3 MPa, což zajistí snadné opětovné vykopání. Tyto směsi danou pevnostní hranici i přesahují. Zdá se, že nejvyšších pevností po 56 dnech dosahovala směs s 1,5 % vápna a 4 % cementu a to 0,34 MPa.



**Obrázek 11.9** Hodnoty objemové hmotnosti čerstvé a zatvrdlých směsí na bázi jílovité zeminy, 4 % cementu a vápna

Objemové hmotnosti odpovídají předešlým směsím. U vzorku se 4 % cementu a 1,5 % vápna se vyskytla při měření po 14 dnech vyšší objemová hmotnost, než u srovnávaných vzorků.

U hodnot smrštění (Tabulka 11.3) je zachován trend, kdy kombinace vápna a cementu způsobuje vyšší objemovou stálost. Vzorky pouze se 4 % cementu dosahují



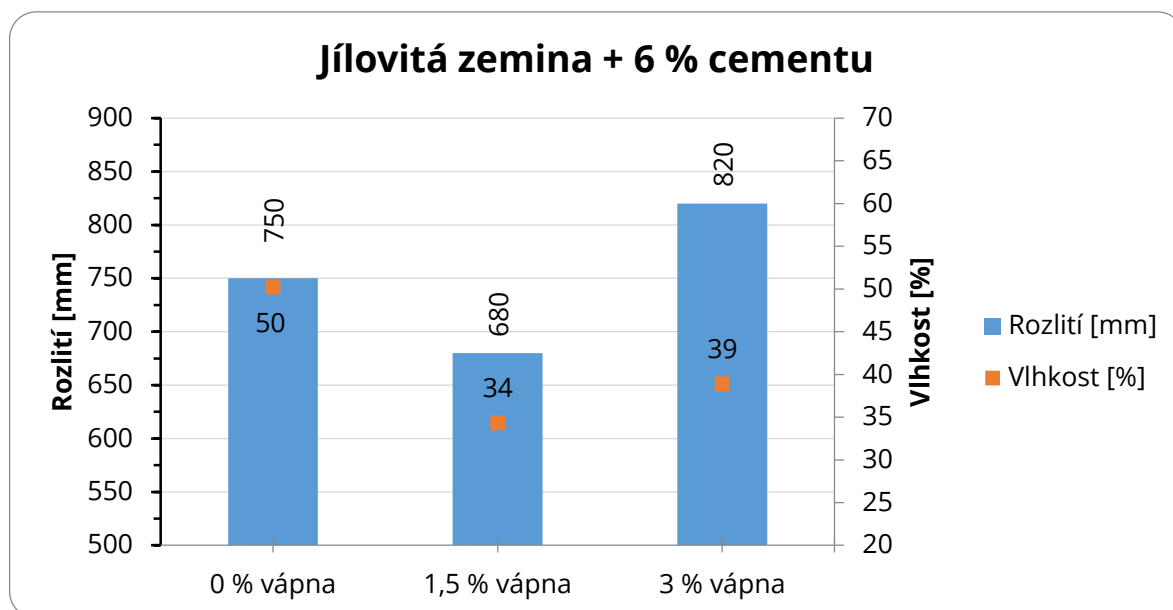
většího smrštění, což je zřejmě způsobeno vyšším vodním součinitelem během míchání a absencí vápna. Je zřejmé, že významně nižší vlhkost a minimální smrštění nepomohly k dosažení vyšších pevností.

**Tabulka 11.3 Hodnoty smrštění a vlhkosti směsí na bázi jílovité zeminy, 4 % cementu a vápna**

Směs	Smrštění [%]				Vlhkost [%]				
	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní	Při míchání	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní
Jílovitá zemina + 4 % cementu + 0 % vápna	0,0	1,3	4,9	4,4	51,6	49,8	39,8	21,1	18,4
Jílovitá zemina + 4 % cementu + 1,5 % vápna	0,2	2,1	1,2	0,8	36,2	29,8	31,0	11,3	6,8
Jílovitá zemina + 4 % cementu + 3 % vápna	0,3	0,2	0,8	1,0	38,9	29,3	19,5	14,0	11,5

#### 11.4 ZKOUŠENÍ SMĚSÍ JÍLOVITÉ ZEMINY S VÁPNEM A 6 % CEMENTU

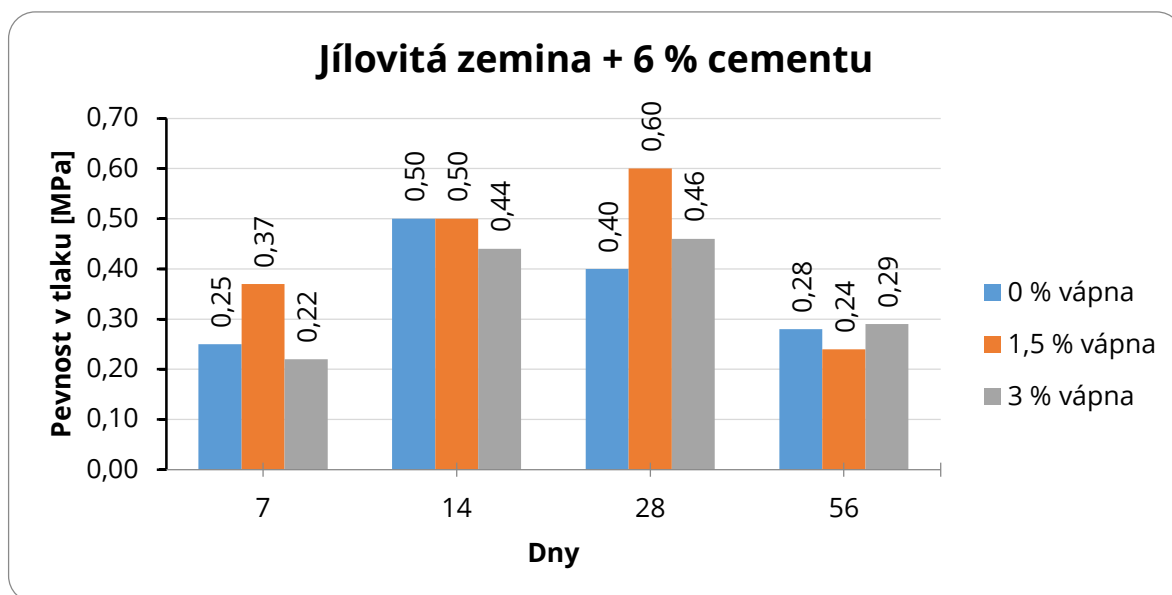
V následující kapitole budou popsány směsi s nejvyšším zvoleným množstvím cementu, tedy 6 %.



**Obrázek 11.10 Závislost rozlití na vlhkosti směsi na bázi jílovité zeminy, 6 % cementu a vápna**

Z Obrázku 11.10 je patrné, že směs, kde bylo použito 6 % cementu, potřebovala vyšší množství vody, aby došlo k požadovanému rozlití. I z předešlých výsledů se jeví, že vápno pozitivně ovlivňuje reologické vlastnosti směsí na bázi jílovitých zemin. Očekávalo se, že vyšší podíl cementu ve směsi způsobí menší rozlití, jelikož by se více

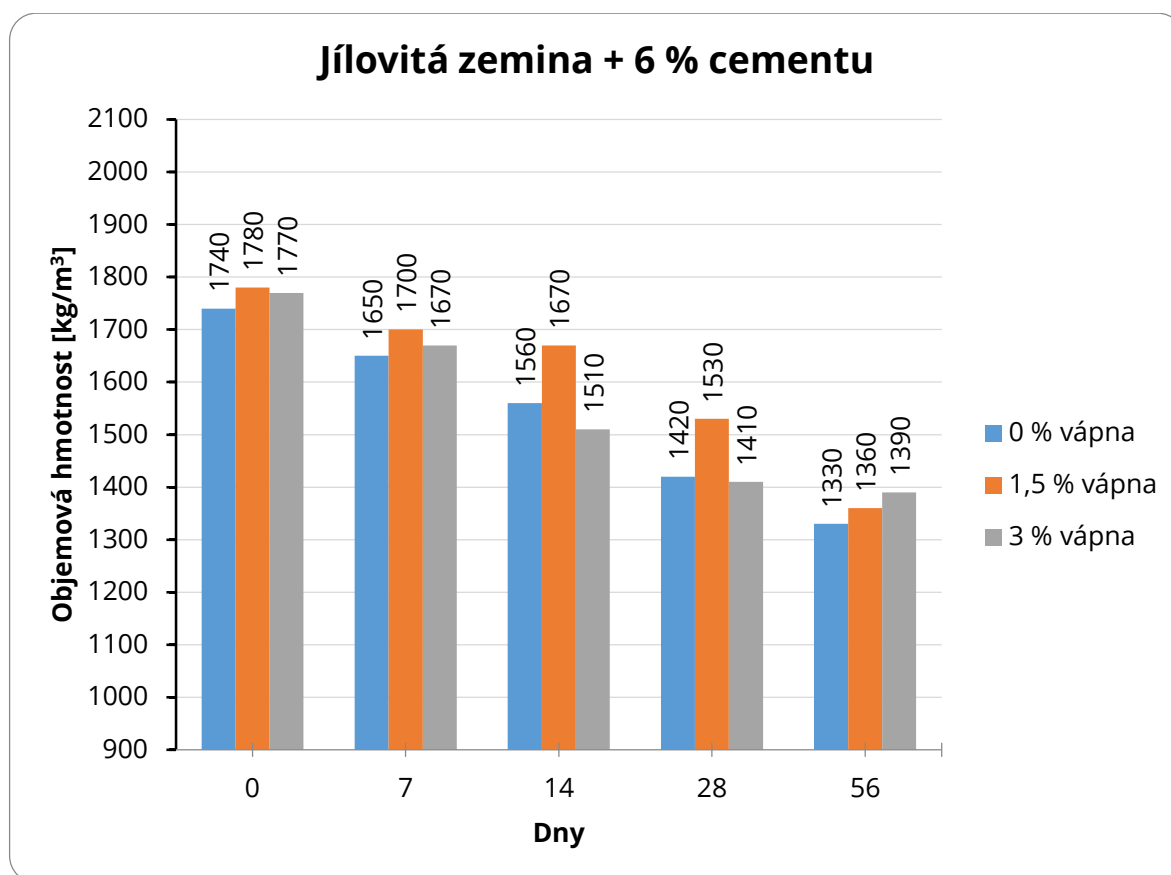
vody spotřebovalo při hydrataci cementu. Z výsledků se však zdá, že množství cementu příliš rozdílné neovlivňuje.



**Obrázek 11.11 Výsledky pevností v tlaku směsí na bázi jílovité zeminy, 6 % cementu a vápna**

Pevnost vzorků se 6 % cementu je již vysoká pro použití zpětných samozhutnitelných zálivek u inženýrských sítí. Vyšší pevnost však otevírá možnosti využití na jiných místech, jako například pod vozovky, či menší stavby typu zahradní domek apod.

Z Obrázku 11.11 je patrné, že nejvyšších pevností bylo dosaženo do 28 dnů, poté nastal pokles. Bylo by vhodné zjistit, zda se tato vlastnost zachová i při praktickém využití.



**Obrázek 11.12** Hodnoty objemové hmotnosti čerstvé a zatvrdlých směsí na bázi jílovité zeminy, 6 % cementu a vápna

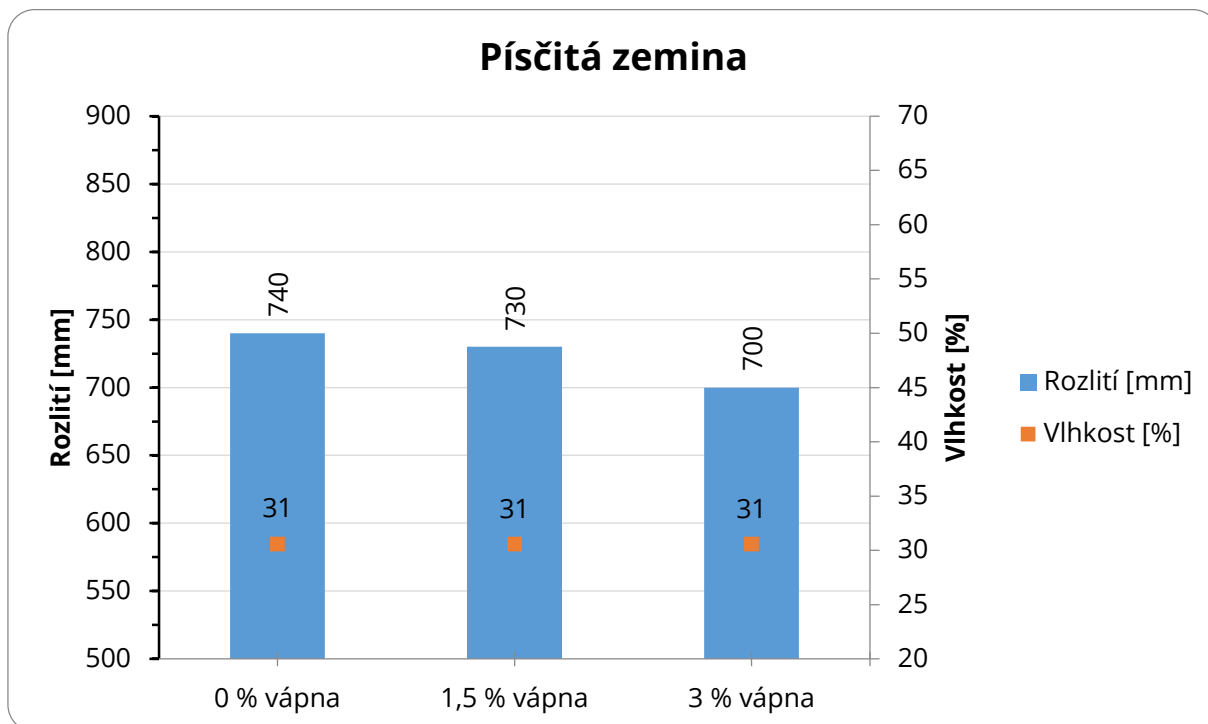
Obrázek 11.12 ukazuje, že objemové hmotnosti jsou obdobné jako u předešlých směsí, opět nastává jejich pokles v průběhu času, což je nejspíše způsobeno vysycháním. U vzorků se 6 % cementu se již příliš nevyskytovaly trhliny. Objemové změny jsou zanedbatelné a při přidání vápna dosahují hodnot kolem 1 %.

**Tabulka 11.4** Hodnoty smrštění a vlhkosti směsí na bázi jílovité zeminy, 6 % cementu a vápna

Směs	Smrštění [%]				Vlhkost [%]				
	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní	Při míchání	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní
Jílovitá zemina + 6 % cementu + 0 % vápna	0,0	-0,1	2,2	3,0	50,2	44,8	38,4	24,1	18,7
Jílovitá zemina + 6 % cementu + 1,5 % vápna	0,1	0,3	1,5	1,1	35,2	28,5	28,1	15,5	5,5
Jílovitá zemina + 6 % cementu + 3 % vápna	0,0	0,7	1,0	1,1	38,9	28,1	16,9	10,6	12,4

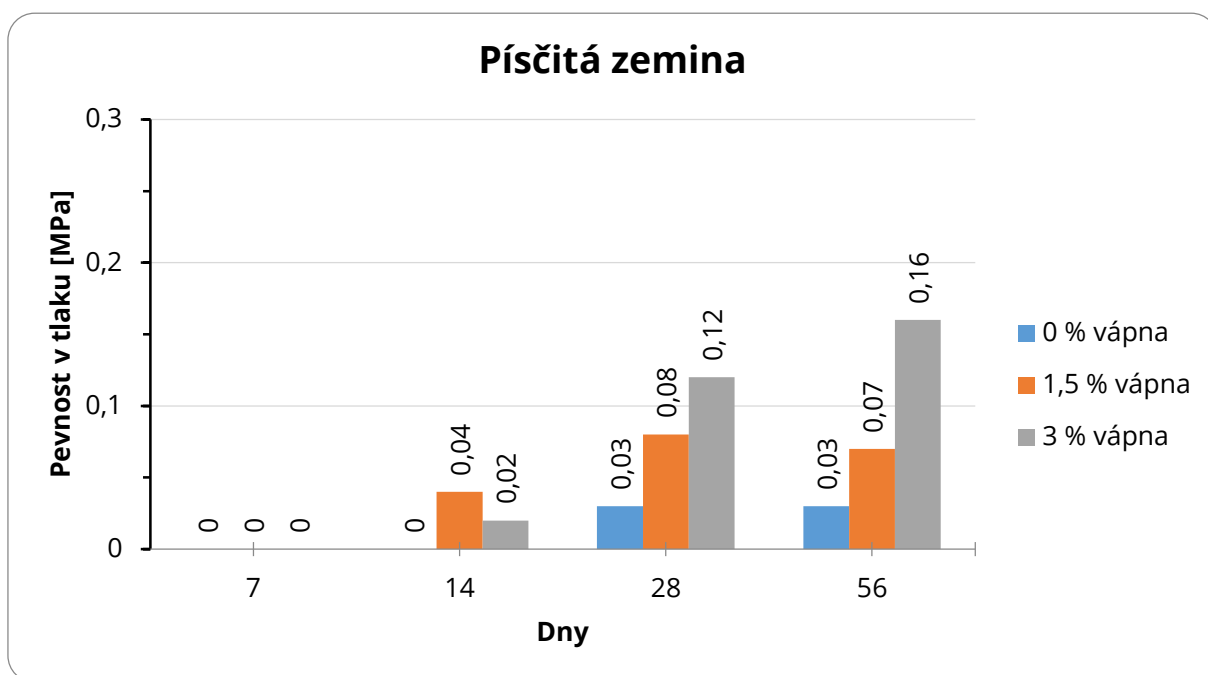
## 11.5 ZKOUŠENÍ SMĚSÍ PÍŠČITÉ ZEMINY S VÁPNEM

Na následujících obrázcích jsou uvedeny receptury, u kterých se zkoumal vliv vápna na písčitou zeminu. Oproti jílovité zemině se předpokládá, že vápno s písčitou zeminou nebude příliš reagovat.



**Obrázek 11.13 Závislost rozlití na vlhkosti směsi na bázi písčité zeminy a vápna**

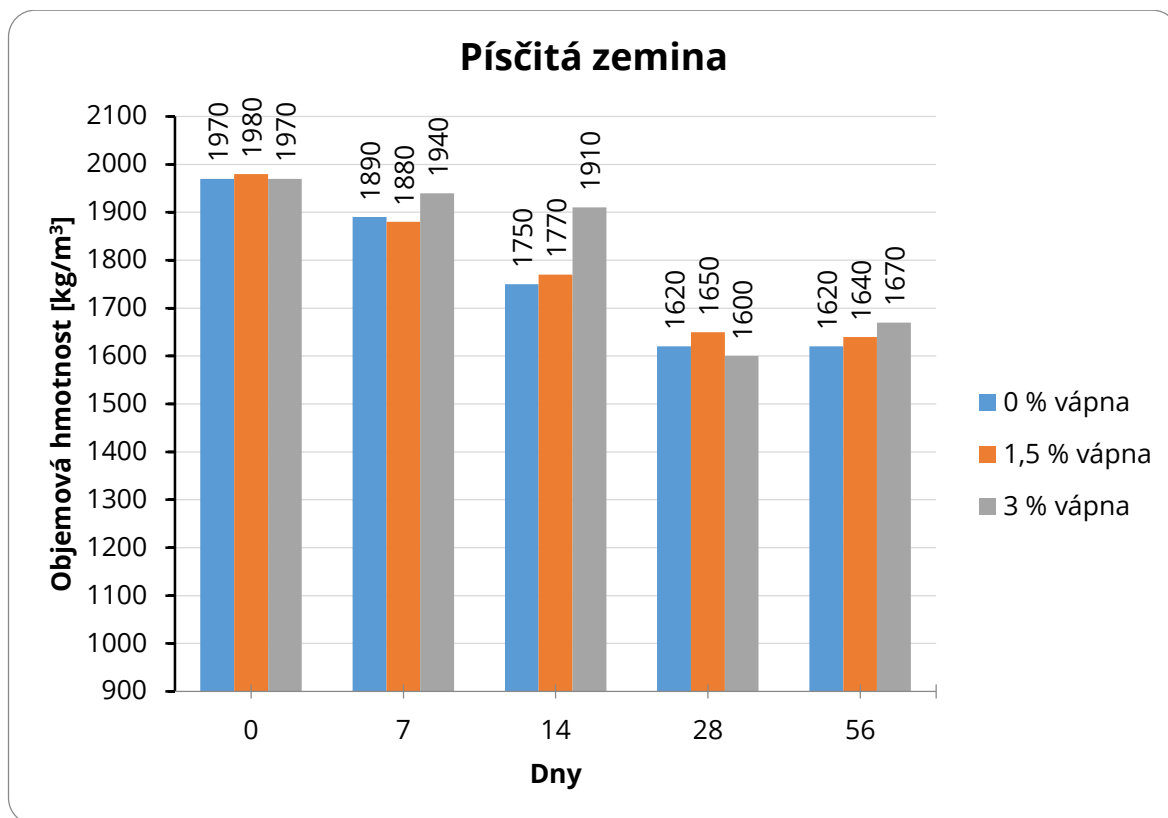
Dle Obrázku 11.13 je jasné, že písčitá zemina dosahovala stejného rozlití za menší vlhkosti než jílovitá zemina. Je to způsobeno hlavně většími zrny zeminy. Dále se zdá, že u písčité zeminy vyšší objem vápna způsobuje menší rozlití, za stejné vlhkosti směsi. Voda zde byla spotřebována na hydrataci vápna a tak došlo ke snížení hodnoty rozlití.



**Obrázek 11.14 Výsledky pevností v tlaku směsí na bázi písčité zeminy a vápna**

Výsledky pevnosti v tlaku směsi písčité zeminy a vápna (Obrázek 11.14) potvrdily předpoklady a byly nižší než u směsí s jílovitou zeminou. Po 7 dnech stále nebylo možné vzorky odformovat jelikož nebyly zatvrdlé, proto nejsou tyto hodnoty v obrázku uvedeny. Pevnosti byly po 28 dnech vyšší u směsi s 3 % vápna, tento trend se udržel i po 56 dnech.

Jako u jílovité zeminy, i u těchto vzorků docházelo k postupnému drolení během manipulace.



**Obrázek 11.15** Hodnoty objemové hmotnosti čerstvé a zatvrdlých směsí na bázi písčité zeminy a vápna

Obrázek 11.15 znázorňuje objemové hmotnosti směsí písčité zeminy a vápna. Ty jsou obecně vyšší než u směsí jílovité zeminy a vápna. Z grafu také vyplývá, že vyšší podíl vápna zapříčiňuje vyšší objemovou hmotnost.

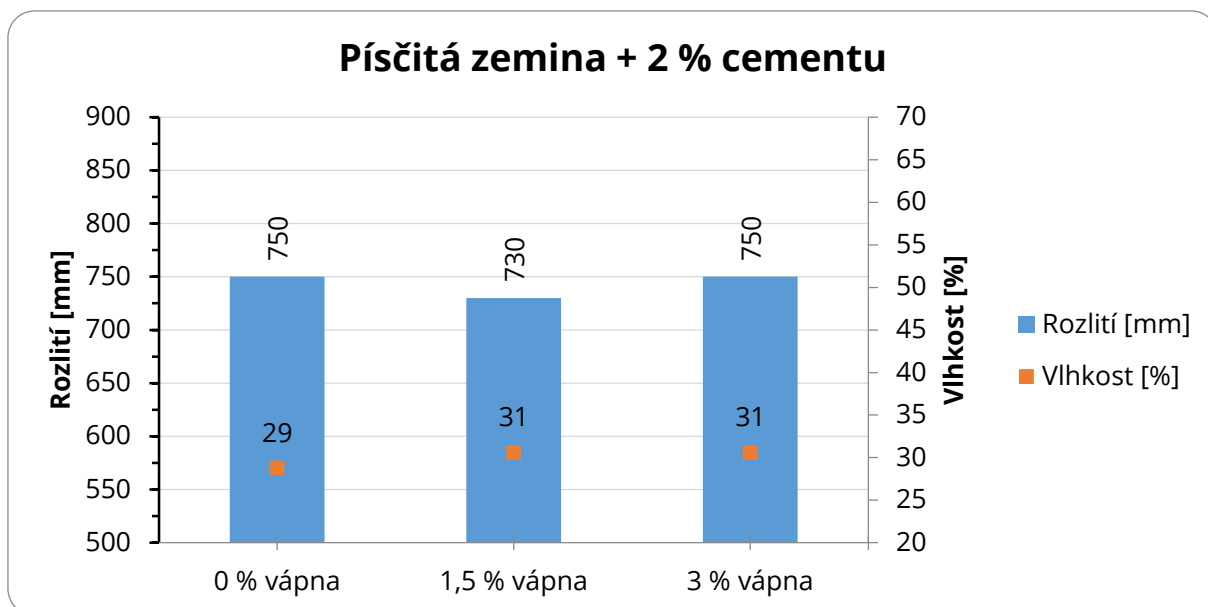
U písčité zeminy docházelo k větší dekantaci než u jílovité zeminy, jelikož se voda nebyla schopna vázat na jílové minerály. Objemové změny u směsi písčité zeminy a vápna byly mnohem menší než u jílovité zeminy. Z toho vyplývá, že voda ze vzorku unikla, ale struktura zůstala relativně zachována a nevyskytovaly se u nich ani praskliny.

**Tabulka 11.5** Hodnoty smrštění a vlhkosti směsí na bázi písčité zeminy a vápna

Směs	Smrštění [%]				Vlhkost [%]				
	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní	Při míchání	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní
Písčítá zemina	0,0	0,0	0,2	0,6	30,6	25,8	15,6	9,3	9,1
Písčítá zemina + 0 % cementu + 1,5 % vápna	0,0	1,2	0,2	0,5	30,6	25,6	13,6	9,5	9,9
Písčítá zemina + 0 % cementu + 3 % vápna	0,0	1,6	0,9	1,6	30,6	29,3	16,0	7,7	8,1

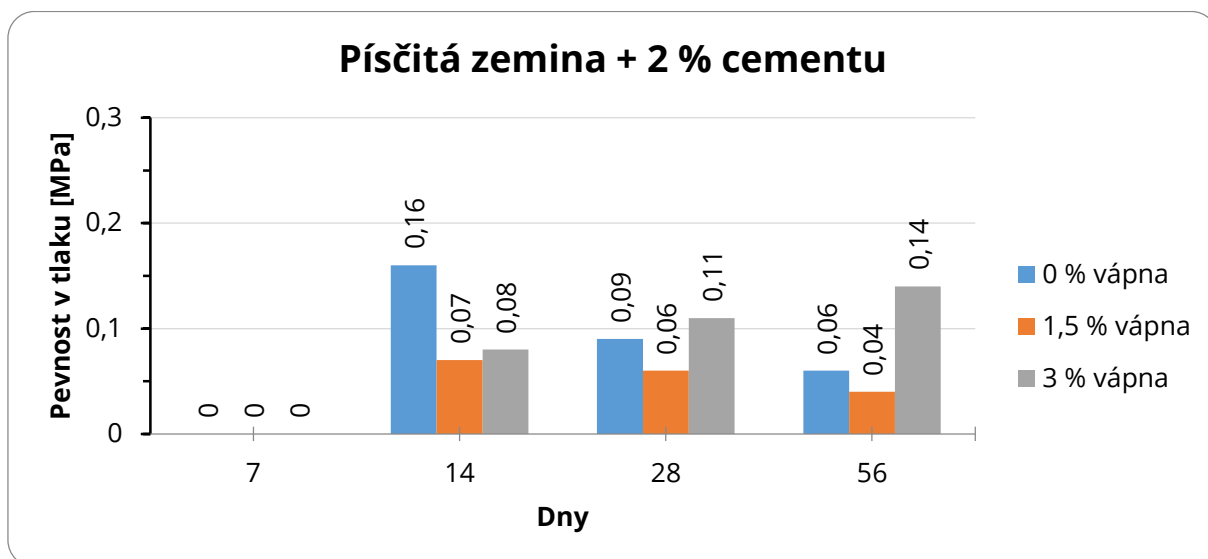
## 11.6 ZKOUŠENÍ SMĚSÍ PÍŠČITÉ ZEMINY S VÁPNEM A 2 % CEMENTU

Na následujících obrázcích jsou uvedeny receptury, u kterých se zkoumal vliv vápna a 2 % cementu na písčitou zeminu. U písčité zeminy by měl mít cement větší účinek na vlastnosti vzorků, než vápno.



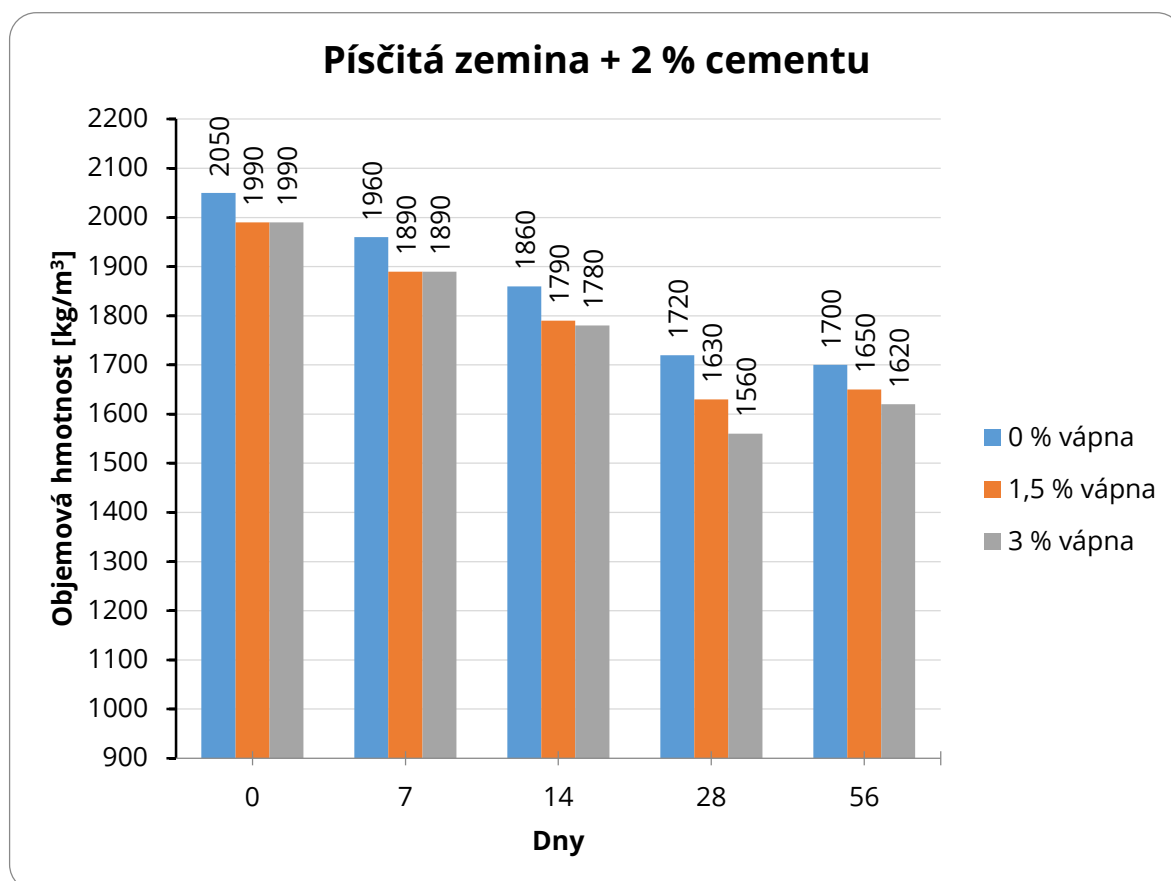
**Obrázek 11.16 Závislost rozlití na vlhkosti směsi na bázi písčité zeminy, 2 % cementu a vápna**

Obrázek 11.16 zobrazuje rozlití směsí písčité zeminy 2 % cementu a vápna. Rozlití je obdobné jako u vzorků bez použití cementu. Zdá se, že 2 % cementu u písčitých zemin mají za zachované vlhkosti zanedbatelný vliv na rozlití směsi.



**Obrázek 11.17 Výsledky pevností v tlaku směsí na bázi písčité zeminy, 2 % cementu a vápna**

Z Obrázku 11.17 je zřejmé, že 2 % cementu výslednou pevnost příliš nenavýšily. Vzorky nebylo možné po 7 dnech odformovat, tudíž se opět první pevnost v tlaku zkoušela až po 14 dnech. Zde je navýšení hodnot oproti vzorkům bez obsahu cementu. Stejně jako u směsi písku a vápna dochází i u těchto vzorků ke drolení, což je způsobeno nízkou pevností v tlaku.



**Obrázek 11.18** Hodnoty objemové hmotnosti čerstvé a zatvrdlých směsí na bázi písčité zeminy, 2 % cementu a vápna

Přidání cementu zásadně neovlivnilo objemové hmotnosti. Ty klesaly s narůstajícím množstvím vápna. Postupem času objemové hmotnosti u vzorků klesaly a po 28 dnech již byly konstantní.

Přidáním cementu způsobilo, že všechny vzorky byly relativně objemově stálé a docházelo jen k malým objemovým změnám. U směsi se 3 % vápna docházelo k většímu vysychání. I u těchto směsí byla pozorována dekantace.

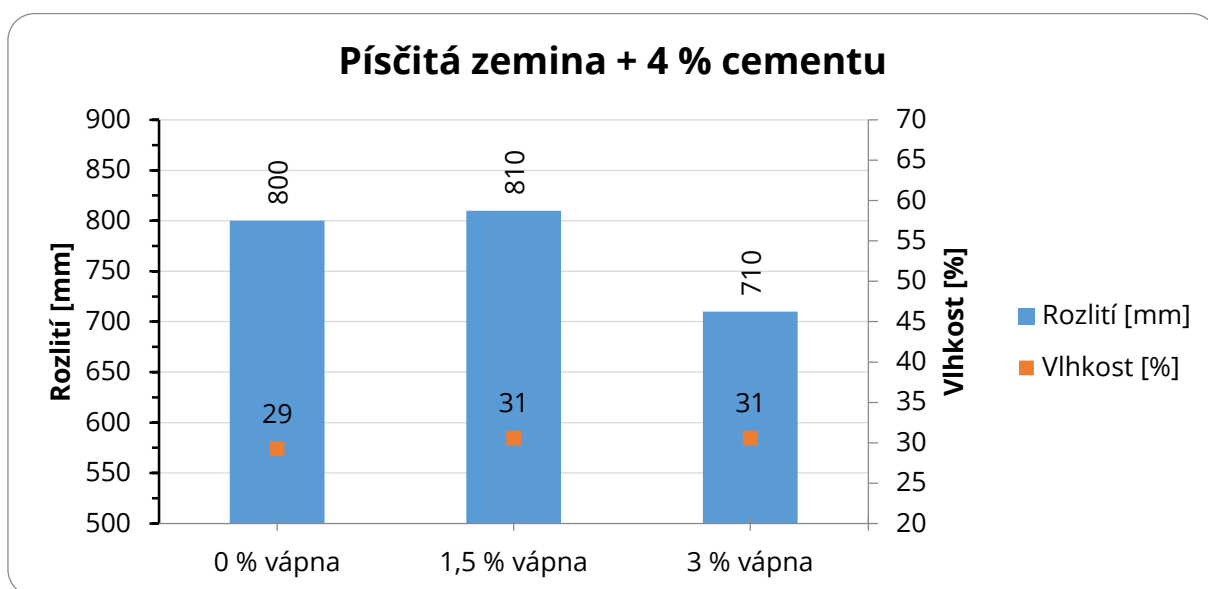


**Tabulka 11.6 Hodnoty smrštění a vlhkosti směsí na bázi písčité zeminy, 2 % cementu a vápna**

Směs	Smrštění [%]				Vlhkost [%]				
	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní	Při míchání	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní
Písčitá zemina + 2 % cementu + 0 % vápna	0,0	-0,3	0,0	-0,1	28,8	24,3	18,8	9,6	9,5
Písčitá zemina + 2 % cementu + 1,5 % vápna	0,0	0,5	-0,1	0,1	30,6	25,7	18,1	11,6	10,5
Písčitá zemina + 2 % cementu + 3 % vápna	0,0	0,2	0,3	0,5	30,6	25,4	15,5	4,7	6,9

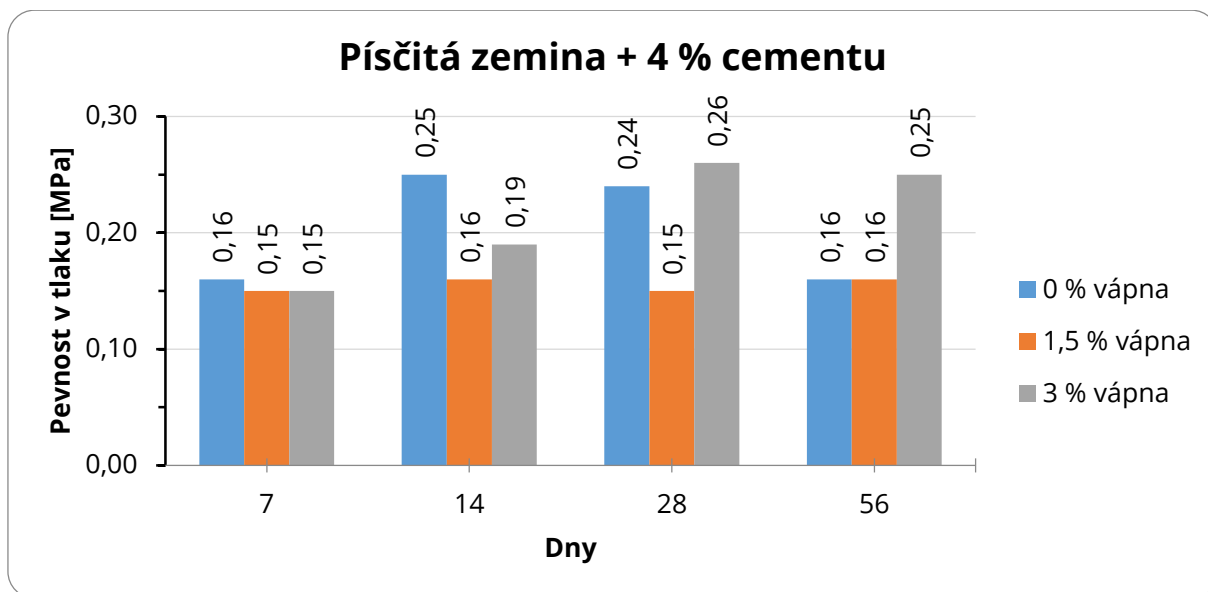
## 11.7 ZKOUŠENÍ SMĚSÍ PÍŠČITÉ ZEMINY S VÁPNEM A 4 % CEMENTU

V rámci další kapitoly se zkoumá vliv 4 % cementu na písčitou zeminu.



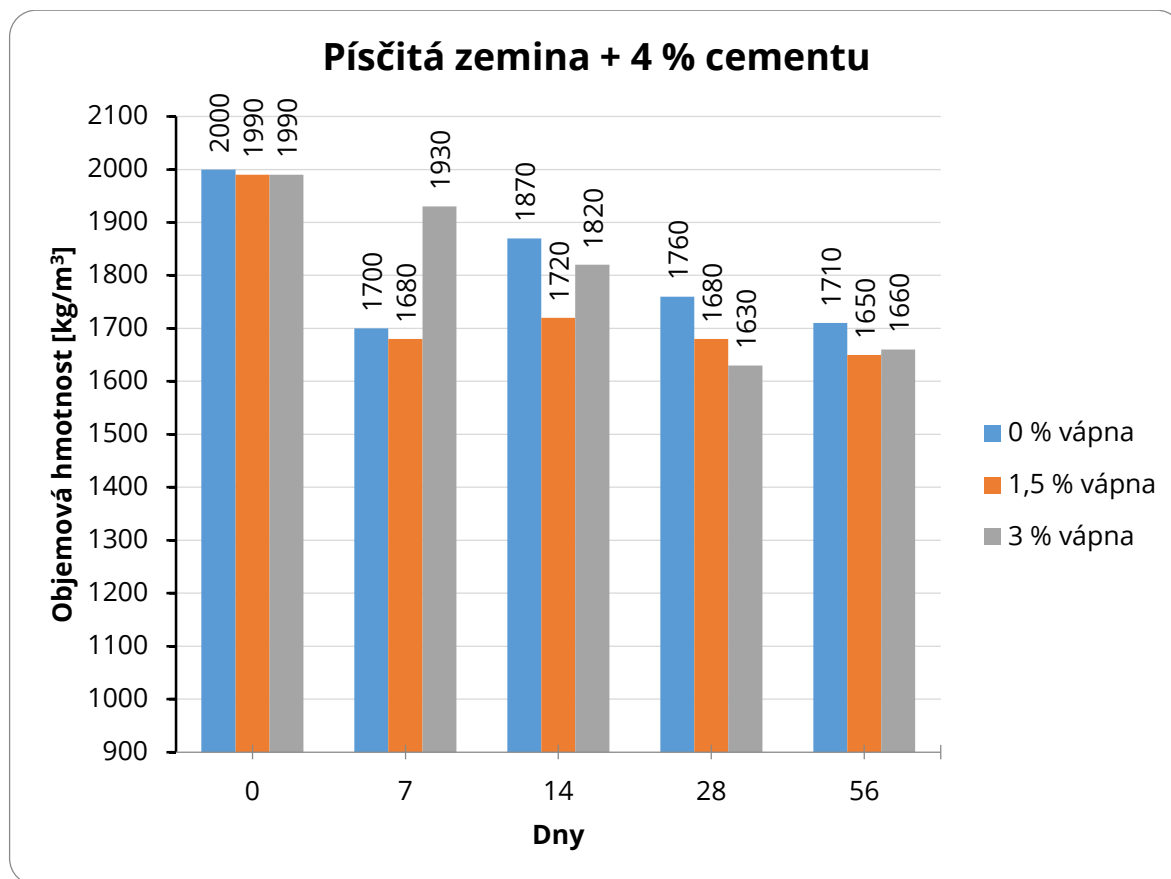
**Obrázek 11.19 Závislost rozlité na vlhkosti směsí na bázi písčité zeminy, 4 % cementu a vápna**

Obrázek 11.19 pojednává o závislosti vlhkosti na rozlité směsí písčité zeminy a 4 % cementu. Toho množství cementu způsobilo při stejné vlhkosti větší rozlité směsí, než u vzorků se 2 % cementu. Při přidání 3 % vápna nastal mírný pokles rozlité. U vzorků byla opět pozorována dekantace.



**Obrázek 11.20 Výsledky pevností v tlaku směsí na bázi písčité zeminy, 4 % cementu a vápna**

Pevnost v tlaku vyšším množstvím cementu vzrostla. Vzorky již bylo možné zkoušet po 7 dnech zrání. U směsí kde bylo přidáno 1,5 % vápna a 4 % cementu byla pozorována konstantní pevnost v tlaku, která se zachovala od prvního zkoušení vzorků po 7 dnech zrání. Tyto vzorky také dosahovaly mírně nižších pevností než porovnávané kombinace. Degradace pevnosti v tlaku byla pozorována u směsi písčité zeminy a 4 % cementu.



**Obrázek 11.21** Hodnoty objemové hmotnosti čerstvé a zatvrdlých směsí na bázi písčité zeminy, 4 % cementu a vápna

U písčité zeminy se po přidání 4 % cementu a vápna dosahovalo obdobných objemových hmotnosti jako u předešlých kombinací. Při měření po 7 dnech zrání se zjistil u směsi bez použití vápna pokles objemové hmotnosti. To mohlo být způsobeno kavernou obsaženou ve vzorku.

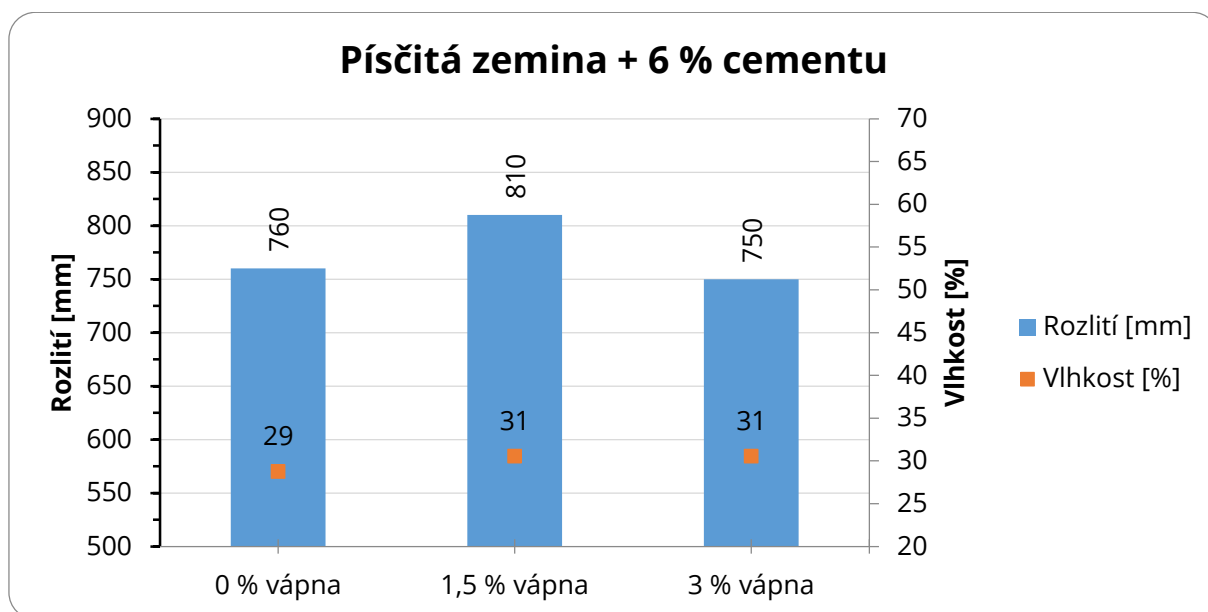
Objemové změny byly u porovnávaných vzorků velmi malé. Zdá se, u některých nastávalo mírná bobtnání, což však může být způsobeno nepřesností formy. U směsí písčité zeminy, 4 % cementu a 3 % vápna docházelo k pomalejšímu vysychání než u porovnávaných vzorků.

**Tabulka 11.7 Hodnoty smrštění a vlhkosti směsí na bázi písčité zeminy, 4 % cementu a vápna**

Směs	Smrštění [%]				Vlhkost [%]				
	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní	Při míchání	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní
Písčitá zemina + 4 % cementu + 0 % vápna	0,0	-0,3	-0,3	0,4	28,8	13,6	18,8	11,8	6,8
Písčitá zemina + 4 % cementu + 1,5 % vápna	-0,5	0,2	0,0	0,4	30,6	13,6	11,0	11,3	10,1
Písčitá zemina + 4 % cementu + 3 % vápna	0,0	0,2	0,3	0,5	30,6	27,7	20,2	7,6	8,6

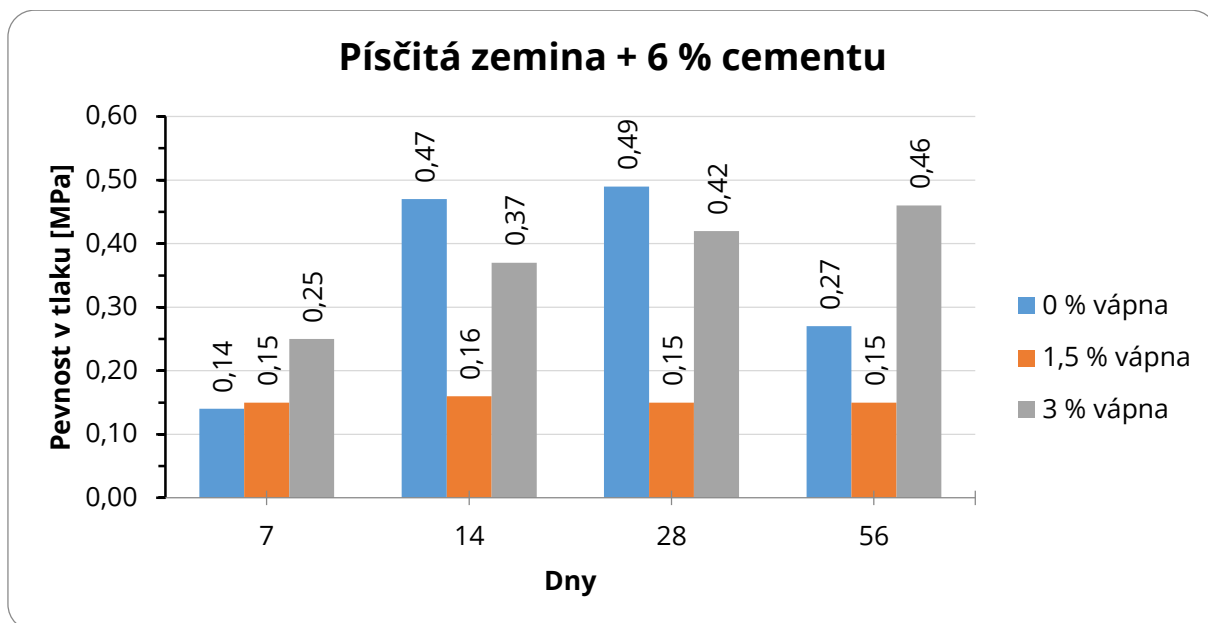
## 11.8 ZKOUŠENÍ SMĚSÍ PÍŠČITÉ ZEMINY S VÁPNEM A 6 % CEMENTU

V následující kapitole budou popsány směsi písčité zeminy s nejvyšším zvoleným množstvím cementu, tedy 6 %.



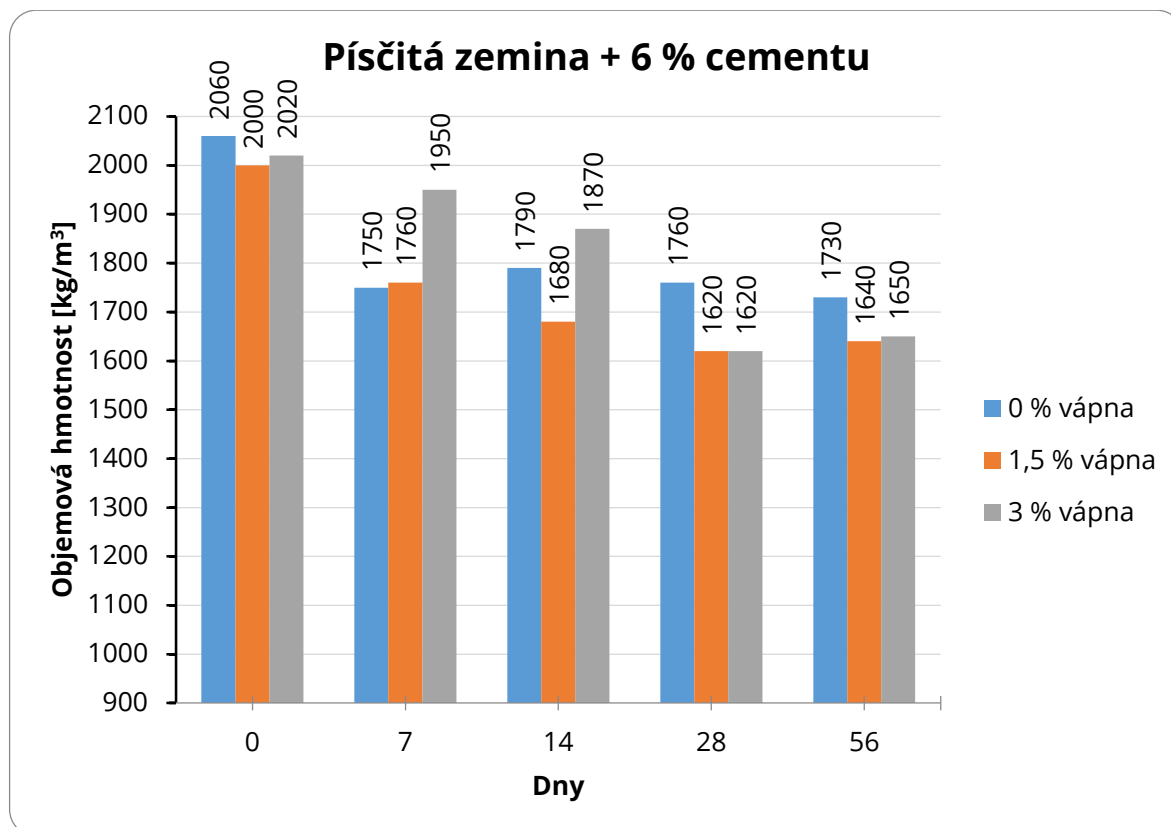
**Obrázek 11.22 Závislost rozlití na vlhkosti směsí na bázi písčité zeminy, 6 % cementu a vápna**

Při zachovaném vodním součiniteli je rozlití obdobné jako u směsi se 4 % cementu. Mírně horší reologické vlastnosti byly zaznamenány u směsi, kde nebylo použito vápno. Dle zkoušky sednutí-rozlitím bychom všechny směsi zařadili do kategorie SF3. Této kategorie bylo dosaženo i přes skutečnost, že u všech písčitých směsí byl použit obdobný vodní součinitel.



**Obrázek 11.23 Výsledky pevností v tlaku směsí na bázi písčité zeminy, 6 % cementu a vápna**

Pevnost v tlaku (Obrázek 11.23) byla oproti vzorkům se 4 % cementu navýšená. Pouze u směsi, kde bylo použito 1,5 % vápna, vycházely pevnosti obdobné, jako u směsi kdy bylo použito menší množství cementu. To může být způsobeno horší homogenizací čerstvé směsi. Tam, kde nebylo použito vápno, je opět zaznamenán mírný pokles u pevnosti v tlaku měřené po 56 dnech.



**Obrázek 11.24** Hodnoty objemové hmotnosti čerstvé a zatvrdlých směsí na bázi písčité zeminy, 6 % cementu a vápna

Objemové hmotnosti dosahují obdobných hodnot jako u předešlých směsí písčité zeminy. Čerstvé směsi dosahují objemové hmotnosti okolo 2000 kg/m<sup>3</sup> a postupně vlivem zrání klesají. Po 28 dnech se zdá, že jsou již objemové hmotnosti ustáleny.

Objemové změny dosahují hodnot do 1 %, jen u směsi písčité zeminy, 6 % cementu a 3 % dochází u měření po 56 dnech ke smrštění 2,2 %. To může být způsobeno nepřesností formy.

**Tabulka 11.8** Hodnoty smrštění a vlhkosti směsí na bázi písčité zeminy, 6 % cementu a vápna

Směs	Smrštění [%]				Vlhkost [%]				
	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní	Při míchání	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní
Píščitá zemina + 6 % cementu + 0 % vápna	0,0	-0,5	-0,7	-0,3	28,8	13,6	15,2	14,4	7,9
Píščitá zemina + 6 % cementu + 1,5 % vápna	-0,1	0,5	0,0	-0,1	30,6	16,3	10,8	8,9	8,7
Píščitá zemina + 6 % cementu + 3 % vápna	0,0	0,7	-0,5	2,2	30,6	27,3	22,3	10,4	8,3

## **12 ETAPA 3 - VLIV ZTEKUCUJÍCÍCH PŘÍRAD**

Po zkoumání vlivu stabilizačních přísad se začaly na vybraných kombinacích zkoumat vlivy přísad ztekucujících (plastifikačních). Hlavním předpokladem, proč by se měly použít plastifikační přísady, je snížení potřebné množství vody, které je nutné pro dosažení požadovaných reologických vlastností.

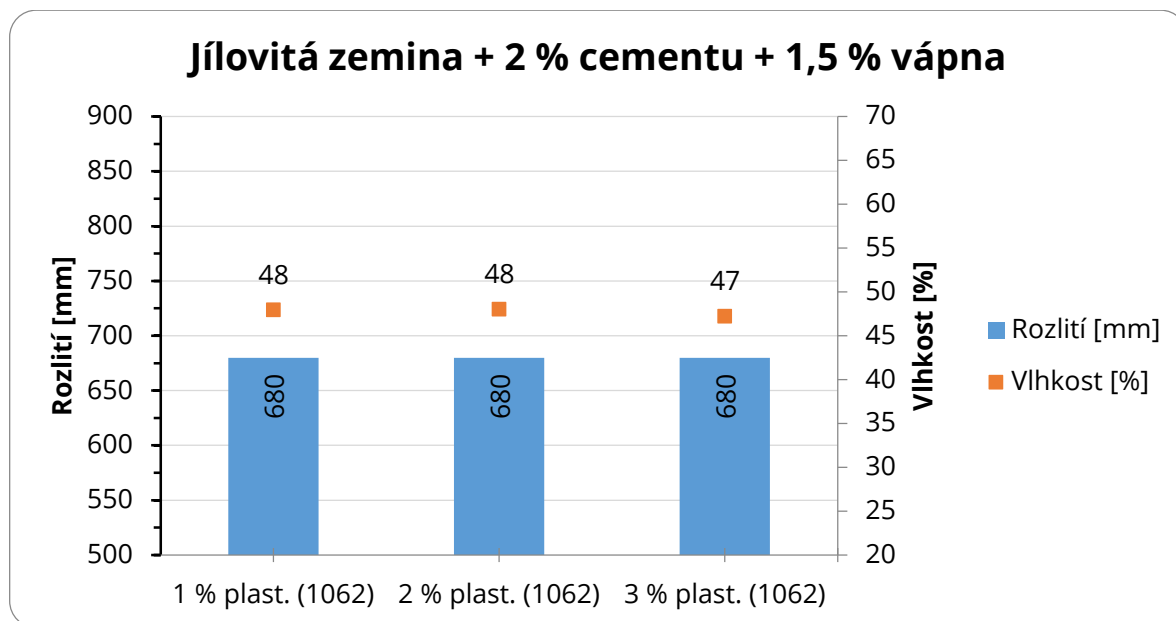
Vybrané kombinace byly u obou zemin 2 % cementu a 1,5 % vápna. Výsledky těchto směsí splňují požadované kritéria a jsou ekonomicky výhodné. Jelikož byly výsledky až na pevnost obdobné, tak se u jedné plastifikační přísady vyzkouší směs se 4 % cementu a 1,5 % vápna. To by mělo poskytnout lepší představu, jaké vlastnosti budou mít směsi, kde bude požadovaná vyšší pevnost.

Doporučené množství plastifikační přísady se většinou volí v řádu desetin procent z hmotnosti cementu. Jelikož je množství cementu ve ztekucených zeminách menší než v betonových směsích, určilo se, že se bude zkoumat vliv 1 %, 2 % a 3 % plastifikační přísady z hmotnosti cementu.

Použité zkoušky byly stejné jako u předcházející kapitoly, u směsí byla navíc stanovována doba tuhnutí, jejíž výsledky budou pouze shrnuty na konci kapitoly 14. Je to způsobeno velkým množstvím neúspěšných pokusů, kterými byla snaha optimalizovat metodu zkoušenou dle kapitoly 9.2.2.

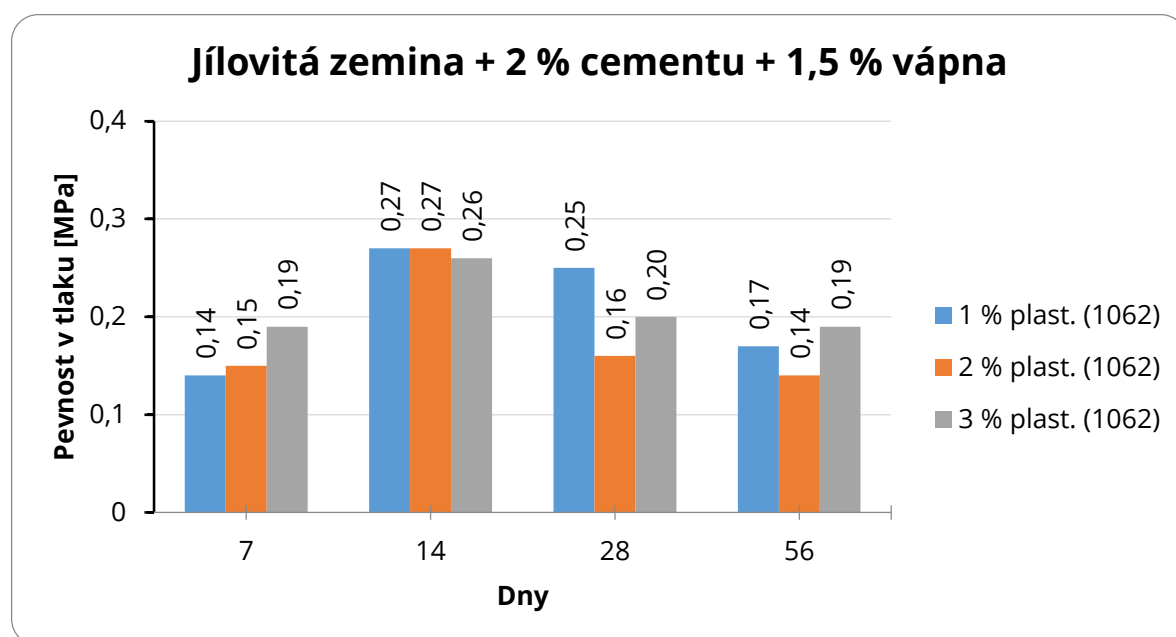
### **12.1 ZKOUŠENÍ SMĚSÍ JÍLOVITÉ ZEMINY S 1,5 % VÁPNA, 2 % CEMENTU A PLASTIFIKAČNÍ PŘÍSADOU SIK A VISCOCRETE – 1062**

Jako první plastifikační přísada byla vybrána Sika ViscoCrete – 1062, která byla přidána do směsi jílovité zeminy, 2 % cementu a 1,5 % vápna. Výsledky budou porovnávány se směsí, kde plastifikační přísada nebyla použita.



**Obrázek 12.1 Závislost rozliti na vlhkosti směsi na bázi jílovité zeminy, 2 % cementu, 1,5 % vápna a plast. Sika ViscoCrete - 1062**

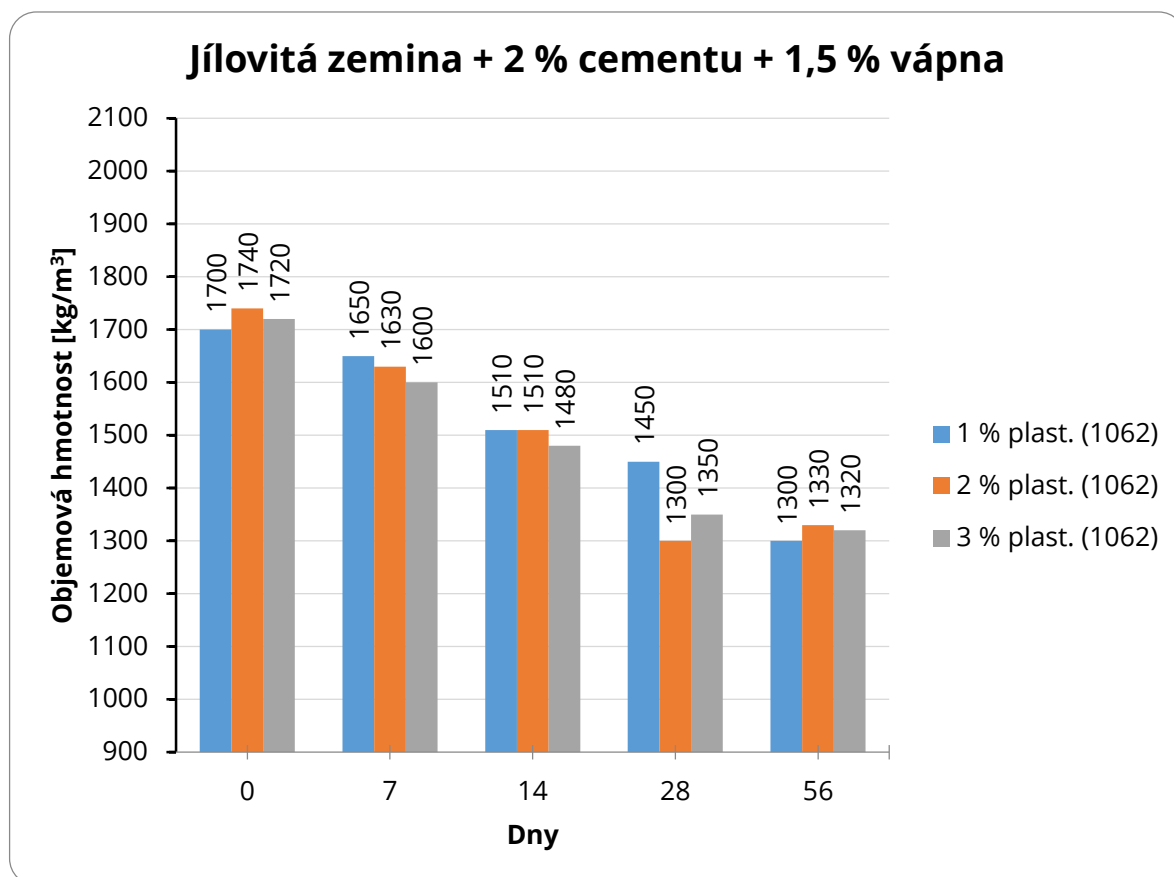
Dle Obrázku 12.1 je zřejmé, že použitá plastifikační přísada nezlepšila reologické vlastnosti. Naopak bylo při původním vodním součiniteli, dosaženo menšího rozliti. To bylo zřejmě způsobeno lepší dispergací zrn jílovité zeminy, což umožnilo pojmout většího množství vody. Z grafu je také zřejmé, že množství použité plastifikační přísady již nemělo zásadní vliv na výsledné rozliti.



**Obrázek 12.2 Výsledky pevností v tlaku směsí na bázi jílovité zeminy, 2 % cementu, 1,5 % vápna a plast. Sika ViscoCrete - 1062**



Obrázek 12.2 značí, že plastifikační přísada Sika ViscoCrete -1062 měla pozitivní vliv na rychlejší nárůst pevnosti. Postupně se však pevnosti začaly snižovat. Z výsledků vyplývá, že i nejnižší množství plastifikační přísady ovlivní rychlejší nárůst pevnosti, vyšším množstvím se již nedosáhlo zásadních změn.



**Obrázek 12.3 Hodnoty objemové hmotnosti čerstvé a zatvrdlých směsí na bázi jílovité zeminy, 2 % cementu, 1,5 % vápna a plast. Sika ViscoCrete – 1062**

Z Obrázku 12.3 vyplývá, že zkoumaná plastifikační přísada nemá podstatný vliv na objemové hmotnosti.

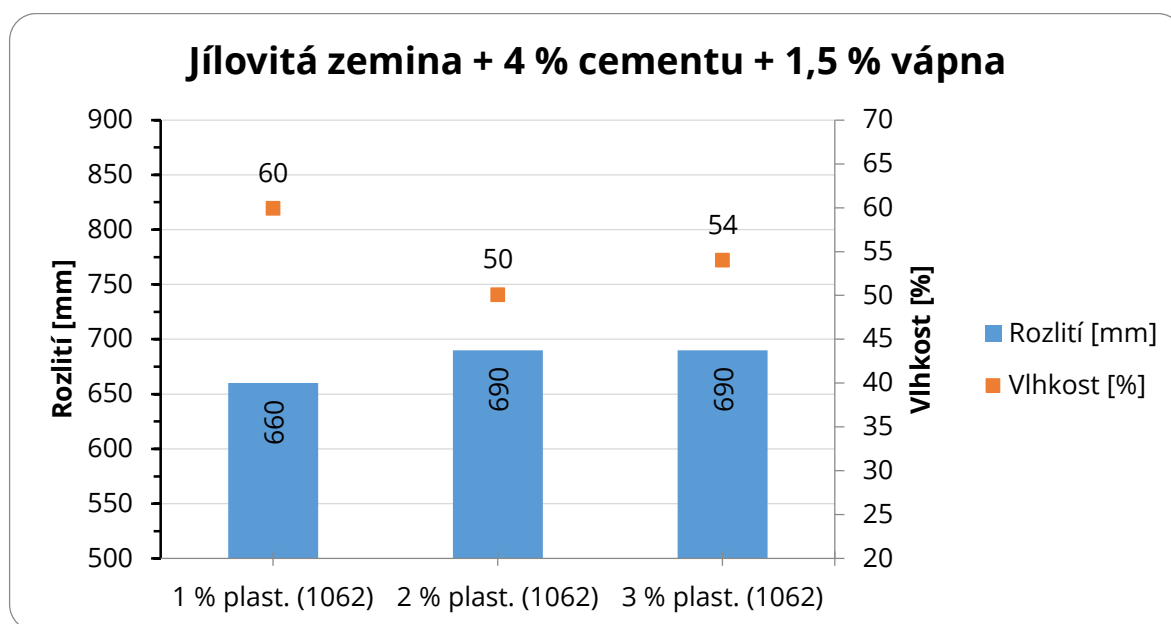
Plastifikační přísada pozitivně ovlivnila objemovou stálost, která je než u směsi bez ní. Také vlhkost uchována ve vzorcích byla vyšší než u směsi bez použití plastifikační přísady. To by mohlo podpořit myšlenku lepší dispergace zrn a lepšího vázaní vody ve směsi. Je vhodné podotknout, že u směsí nedocházelo k dekantaci a během zrání se téměř neobjevovaly trhliny způsobeny vysycháním vzorků.

**Tabulka 12.1 Hodnoty smrštění a vlhkosti směsí na bázi jílovité zeminy, 2 % cementu, 1,5 % vápna a plast. Sika ViscoCrete – 1062**

Směs	Smrštění [%]				Vlhkost [%]				
	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní	Při míchání	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 1 % plast. (1062)	1,8	2,8	3,6	3,1	47,9	37,5	27,8	22,1	15,6
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 2 % plast. (1062)	0,7	1,7	2,6	3,8	48,0	37,6	28,1	15,9	14,5
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 3 % plast. (1062)	2,6	2,7	4,3	3,6	47,2	32,9	27,0	15,9	15,5

## 12.2 ZKOUŠENÍ SMĚSÍ JÍLOVITÉ ZEMINY S 1,5 % VÁPNA, 4 % CEMENTU A PLASTIFIKAČNÍ PŘÍSADOU SIKA VISCOCRETE – 1062

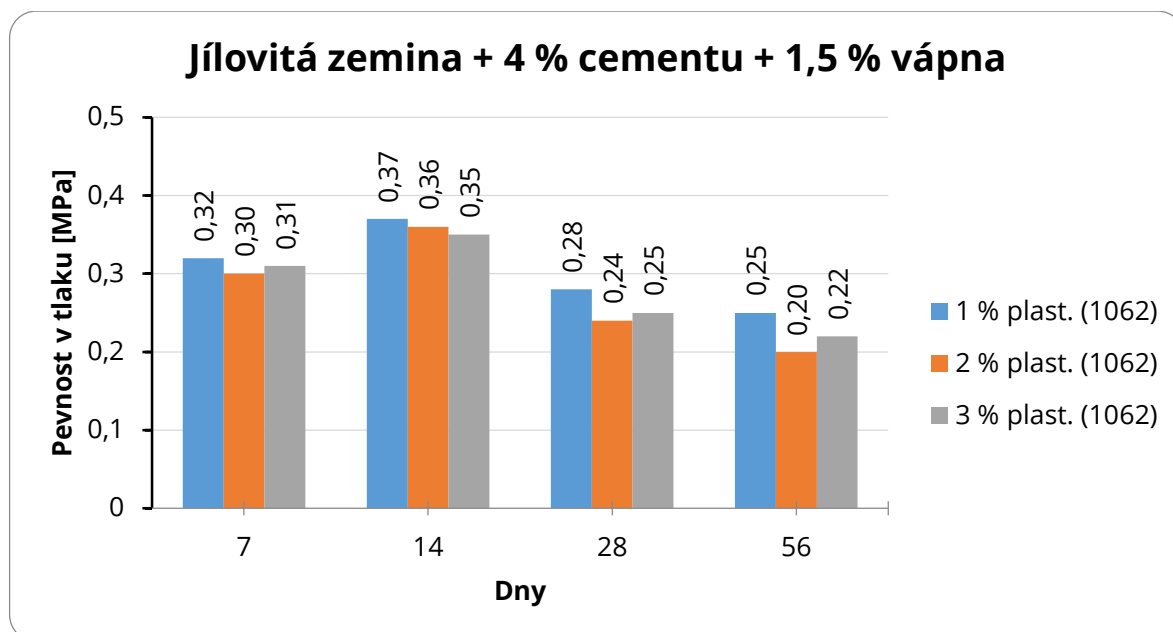
Plastifikační přísada Sika ViscoCrete - 1062 byla vybrána také pro směs jílovité zeminy, 4 % cementu a 1,5 % vápna. Nutno podotknout, že dvojnásobné množství cementu zapříčiní přidání dvojnásobného množství plastifikační přísady, aby bylo zachované procentuální dávkování.



**Obrázek 12.4 Závislost rozlité na vlhkosti směsí na bázi jílovité zeminy, 4 % cementu, 1,5 % vápna a plast. Sika ViscoCrete - 1062**

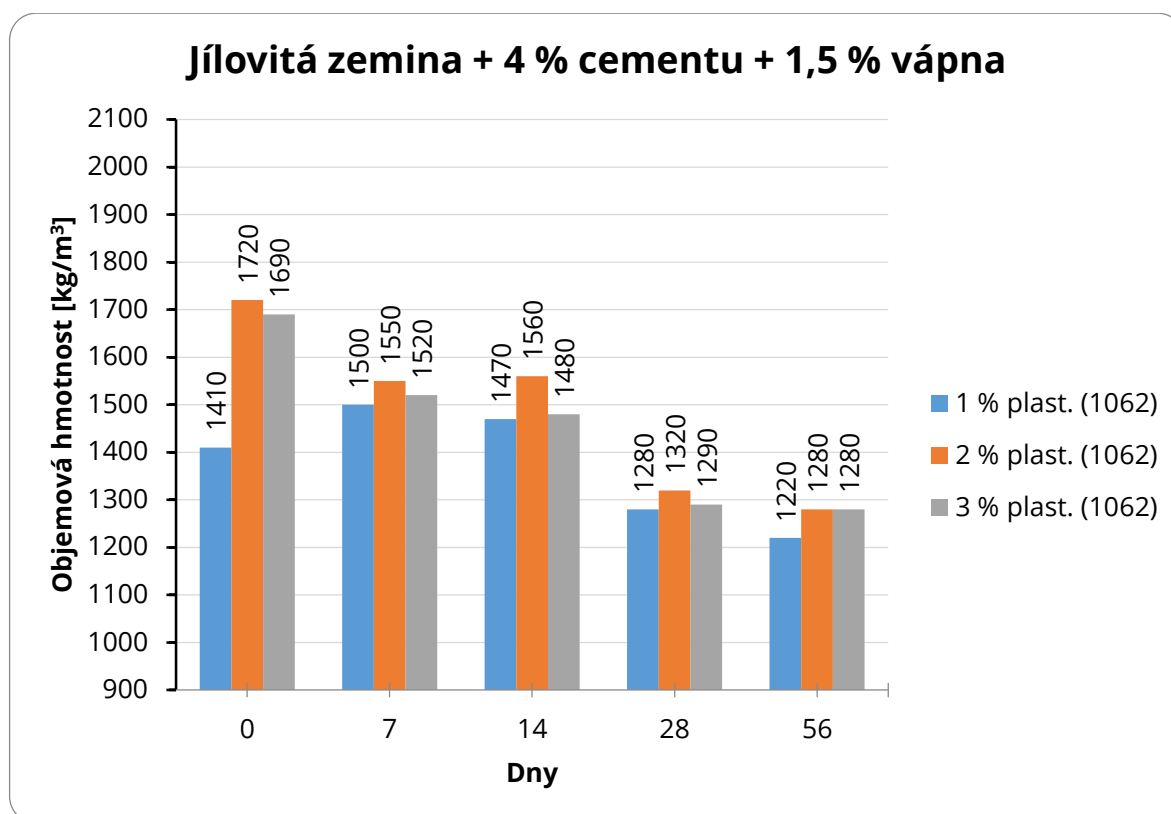
Z Obrázku 12.4 vyplývá, že plastifikační přísada Sika ViscoCrete – 1062 způsobuje u směsi s jílovitou zeminou, 4 % cementu a 1,5 % vápna horší reologické vlastnosti. Pro připomenutí, obdobná směs bez plastifikační přísady dosahovala při 36% vlhkosti rozlité 850 mm. Potřebný vysoký vodní součinitel mohla způsobovat delší doba míchání

čerstvé směsi, či větší dispergace částic jílovité zeminy. Z grafu vyplývá, že pro nejlepší reologické vlastnosti směsi je nejvýhodnější použití 2 % plastifikátoru.



**Obrázek 12.5 Výsledky pevností v tlaku směsí na bázi jílovité zeminy, 4 % cementu, 1,5 % vápna a plast. Sika ViscoCrete - 1062**

Obrázek 12.5, který zobrazuje pevnost v tlaku, ukazuje, že vývin pevností je značný již po 7 dnech zrání. Z toho lze usoudit, zkoumaná plastifikační přísada urychluje nárůst pevností, dlouhodobější pevnosti však spíše snižuje. Množství plastifikační přísady opět nemá příliš zásadní vliv na konečné pevnosti.



**Obrázek 12.6 Hodnoty objemové hmotnosti čerstvé a zatvrdlých směsí na bázi jílovité zeminy, 4 % cementu, 1,5 % vápna a plast. Sika ViscoCrete – 1062**

U hodnot objemových hmotností si lze povšimnout, že vysoká vlhkost směsi s 1 % plastifikační přísady způsobila nízkou objemovou hmotnost v čerstvém stavu. Ostatní hodnoty přibližně odpovídají směsi bez plastifikační přísady a také směsi se sníženým množstvím cementu.

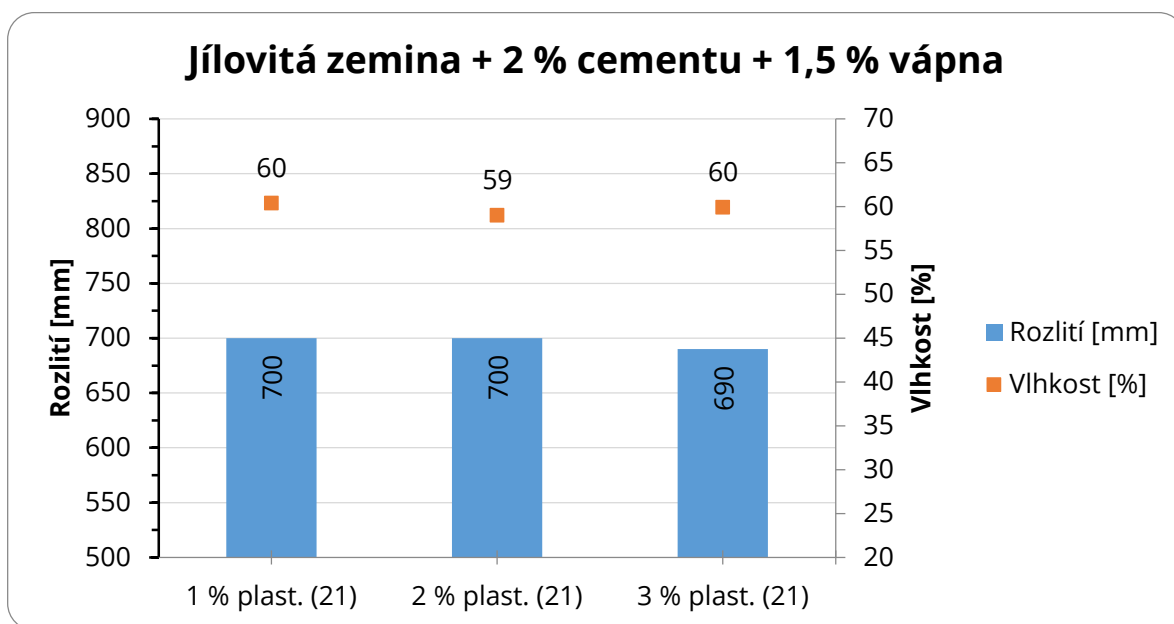
Hodnoty smrštění jsou vyšší než u směsi bez plastifikační přísady, což je způsobeno vyšším vodním součinitelem. U kompozitu s 1 % Sika ViscoCrete je vyšší konečná vlhkost vzorků, což značí lepší provázání všech obsažených složek.

**Tabulka 12.2 Tabulka 11.1 Hodnoty smrštění a vlhkosti směsí na bázi jílovité zeminy, 2 % cementu, 1,5 % vápna a plast. Sika ViscoCrete – 1062**

Směs	Smrštění [%]				Vlhkost [%]				
	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní	Při míchání	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní
J. zem. + 4 % cem. + 1,5 % váp. + 1 % plast. (1062)	1,8	2,8	5,3	4,8	59,9	59,3	57,1	35,0	34,9
J. zem. + 4 % cem. + 1,5 % váp. + 2 % plast. (1062)	0,5	1,7	4,0	3,3	50,1	37,1	33,8	16,8	16,6
J. zem. + 4 % cem. + 1,5 % váp. + 3 % plast. (1062)	1,2	4,3	3,9	4,0	54,0	40,6	32,8	19,2	19,0

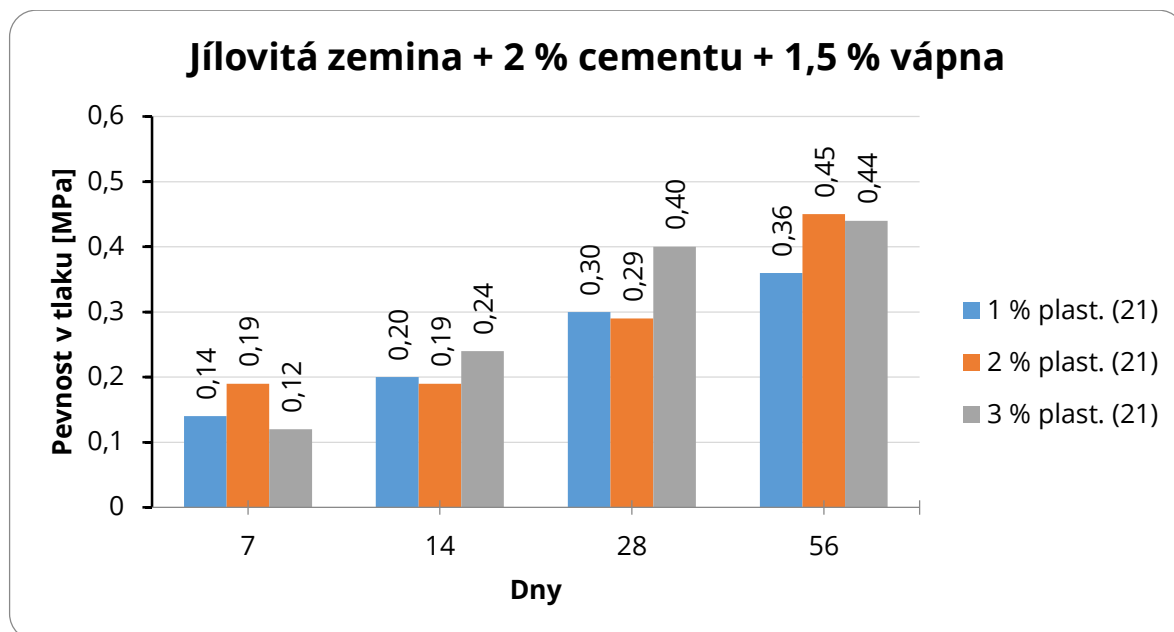
### 12.3 ZKOUŠENÍ SMĚSÍ JÍLOVITÉ ZEMINY S 1,5 % VÁPNA, 2 % CEMENTU A PLASTIFIKAČNÍ PŘÍSADOU SIKA VISCOCRETE – 21

V této kapitole bude zkoumána druhá plastifikační přísada, kterou je Sika ViscoCrete – 21. Ta se bude přidávat do směsi jílovité zeminy, 2 % cementu a 1,5 % vápna.



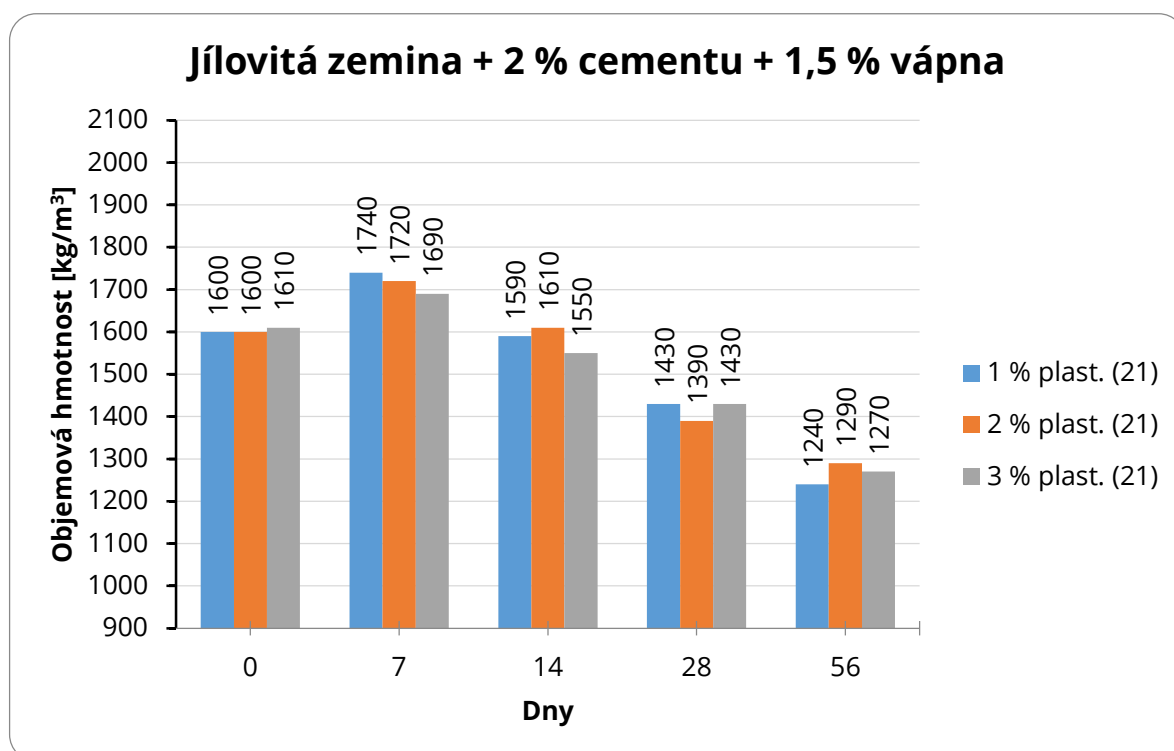
**Obrázek 12.7 Závislost rozlití na vlhkosti směsi na bázi jílovité zeminy, 2 % cementu, 1,5 % vápna a plast. Sika ViscoCrete – 21**

Dle Obrázku 12.7 je patrné, že při použití plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 21 je potřeba o 10 % více vody pro dosažení požadovaného rozlití, než u Sika ViscoCrete – 1062. Všechny zkoumané podíly dosahovaly podobných hodnot.



**Obrázek 12.8 Výsledky pevností v tlaku směsí na bázi jílovité zeminy, 2 % cementu, 1,5 % vápna a plast. Sika ViscoCrete – 21**

Z Obrázku 12.8 je zřetelné, že oproti Sika ViscoCrete – 1062, kde vzorky dosahovaly nejvyšších pevností po 14 dnech zrání, je zde nárůst postupný a výsledné pevnosti jsou vyšší.



**Obrázek 12.9 Hodnoty objemové hmotnosti čerstvé a zatvrdlých směsí na bázi jílovité zeminy, 2 % cementu, 1,5 % vápna a plast. Sika ViscoCrete – 21**

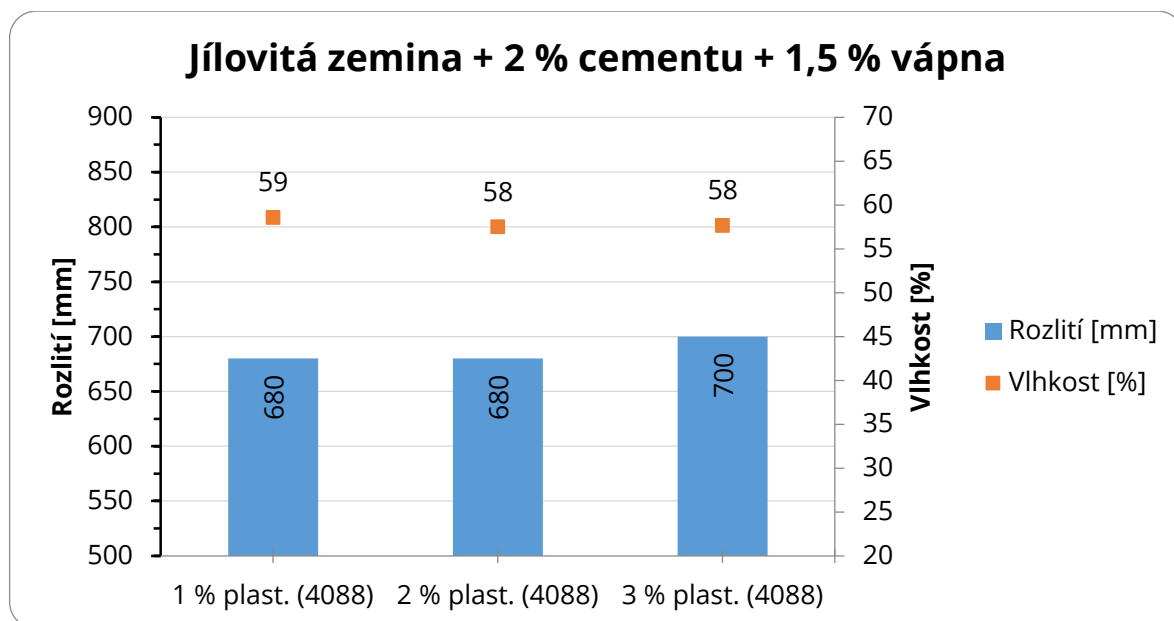
Objemové hmotnosti čerstvých směsí jsou nižší kvůli většímu obsahu vody. Tato skutečnost způsobila větší smrštění vzorků, než u předešlých směsí. Obsah vody ve směsi po 56 dnech dosahoval hodnoty okolo 20 % u všech směsí. Z výsledků se jeví, že všechny zkoumané směsi poměry plastifikační přísady vykazují pouze zanedbatelné odchylky.

**Tabulka 12.3 Hodnoty smrštění a vlhkosti směsí na bázi jílovité zeminy, 2 % cementu, 1,5 % vápna a plast. Sika ViscoCrete - 21**

Směs	Smrštění [%]				Vlhkost [%]				
	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní	Při míchání	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 1 % plast. (21)	6,7	6,0	8,2	7,5	60,4	47,0	43,6	28,7	20,9
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 2 % plast. (21)	6,4	5,5	7,9	8,5	59,0	44,4	42,1	26,3	20,3
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 3 % plast. (21)	4,5	6,4	7,7	8,4	59,9	48,6	39,9	28,7	20,3

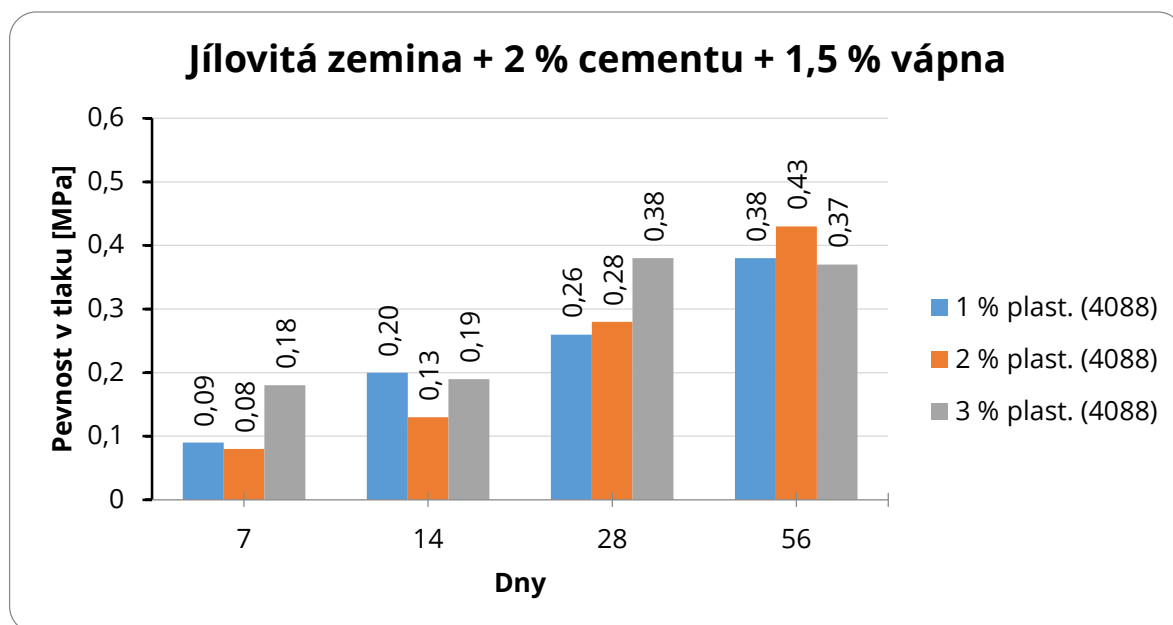
## 12.4 ZKOUŠENÍ SMĚSÍ JÍLOVITÉ ZEMINY S 1,5 % VÁPNA, 2 % CEMENTU A PLASTIFIKAČNÍ PŘÍSADOU SIKa VISCOCRETE – 4088

Nyní bude popsán vliv plastifikační přísady Sika ViscoCrete - 4088 na směs jílovité zeminy 2 % cementu a 1,5 % vápna.



**Obrázek 12.10 Závislost rozlití na vlhkosti směsi na bázi jílovité zeminy, 2 % cementu, 1,5 % vápna a plast. Sika ViscoCrete - 4088**

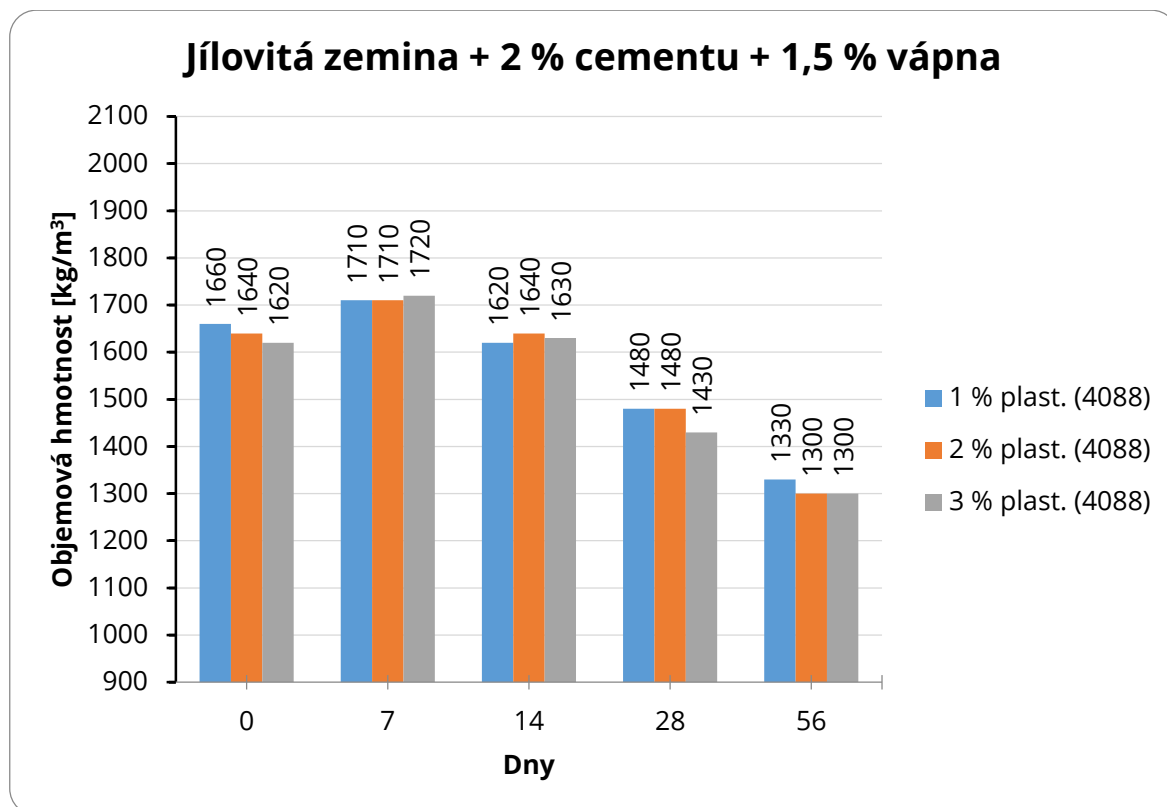
Z Obrázku 12.10, na kterém je popsáno rozlití v závislosti na vlhkosti, je zřejmé, že množství vody potřebné k požadovanému ztekucení směsi je podobné jako při použití plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 21. Zkoumaná plastifikační přísada tedy nemá pozitivní vliv na reologické vlastnosti kompozitu.



**Obrázek 12.11 Výsledky pevností v tlaku směsí na bázi jílovité zeminy, 2 % cementu, 1,5 % vápna a plast. Sika ViscoCrete - 4088**

Také pevnosti v tlaku dosahovaly obdobných hodnot jako u předešlé plastifikační přísady. Obrázek 12.11, zobrazující naměřené hodnoty, značí, že nárůst pevností je pomalejší, než u vzorků s plastifikační přísadou Sika ViscoCrete – 21.





**Obrázek 12.12** Hodnoty objemové hmotnosti čerstvé a zatvrdlých směsí na bázi jílovité zeminy, 2 % cementu, 1,5 % vápna a plast. Sika ViscoCrete – 4088

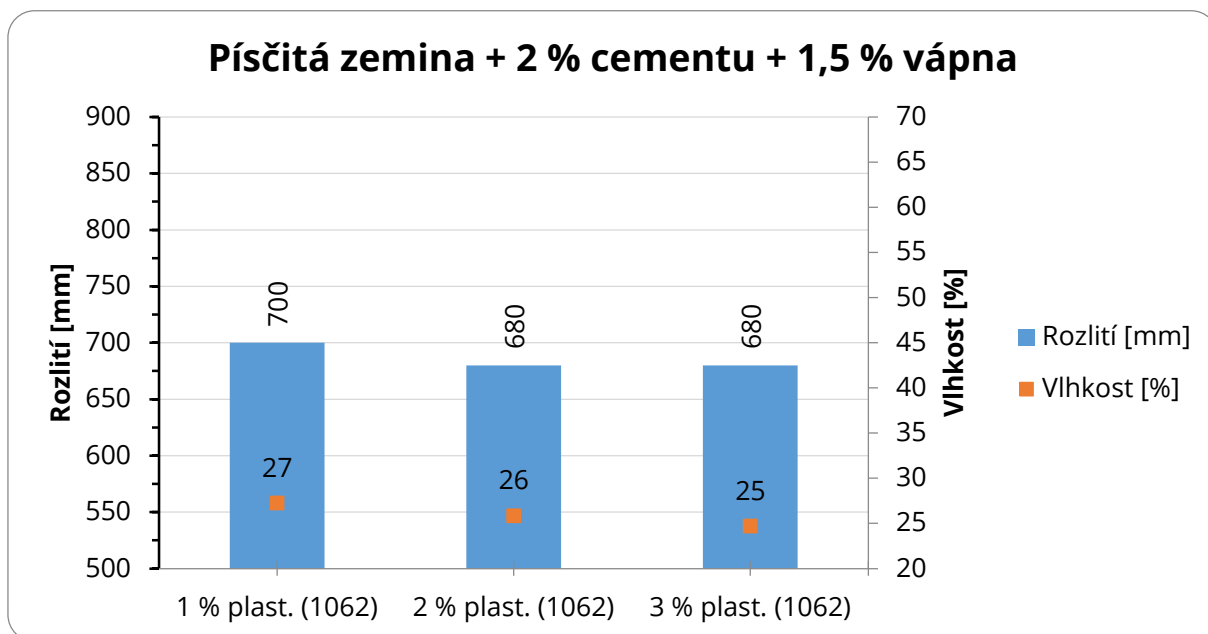
Objemové hmotnosti, smrštění i vlhkosti jsou pro všechny zkoumané směsi podobné. Celkově lze říci, že vliv plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 4088 na jílovitou zeminu s přídatkem 2 % cementu a 1,5 % vápna byl obdobný jako vliv plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 21.

**Tabulka 12.4** Hodnoty smrštění a vlhkosti směsí na bázi jílovité zeminy, 2 % cementu, 1,5 % vápna a plast. Sika ViscoCrete – 4088

Směs	Smrštění [%]				Vlhkost [%]				
	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní	Při míchání	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 1 % plast. (4088)	3,5	4,5	4,3	6,2	58,6	50,3	41,8	34,1	22,5
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 2 % plast. (4088)	3,3	2,9	6,4	7,6	57,5	48,8	46,6	30,7	18,9
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 3 % plast. (4088)	5,7	4,9	7,9	7,6	57,7	43,7	42,2	25,3	20,4

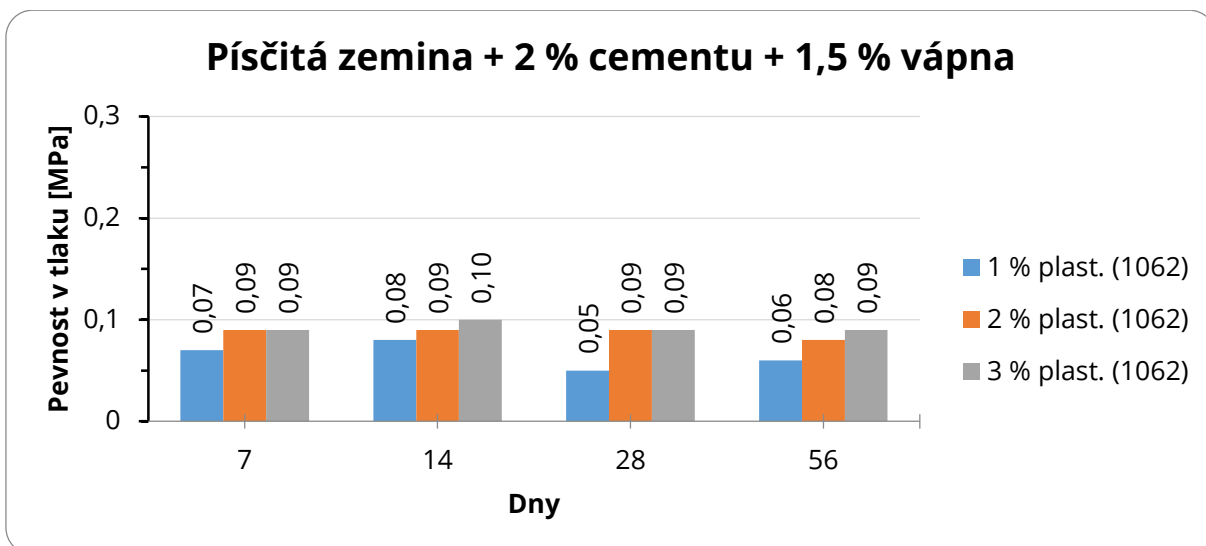
## 12.5 ZKOUŠENÍ SMĚSÍ PÍŠČITÉ ZEMINY S 1,5 % VÁPNA, 2 % CEMENTU A PLASTIFIKAČNÍ PŘÍSADOU SIKÁ VISCOCRETE – 1062

Následující kapitola popisuje vliv plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062 na směs písčité zeminy, 2 % cementu a 1,5 % vápna.



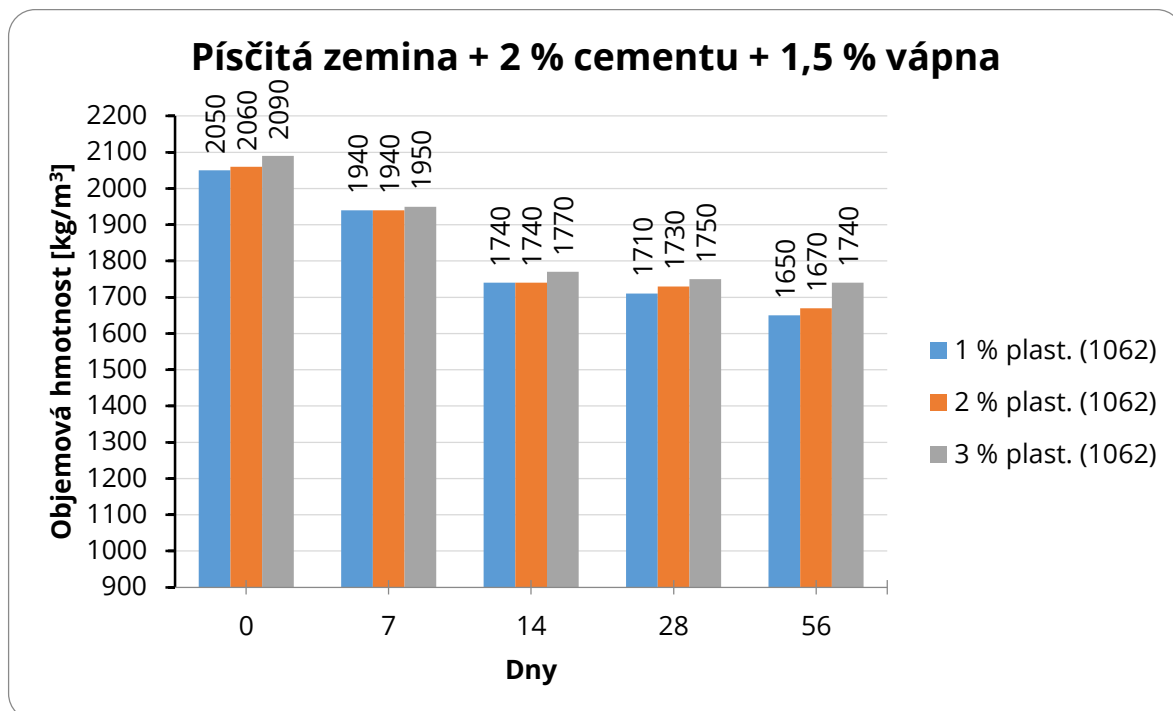
**Obrázek 12.13 Závislost rozlití na vlhkosti směsi na bázi písčité zeminy, 2 % cementu, 1,5 % vápna a plast. Sika ViscoCrete – 1062**

Z Obrázku 12.13 lze zjistit, že zkoumaná plastifikační přísada ovlivnila rozlití písčité zeminy. S vyšším poměrem Sika ViscoCrete -1062 je snižené potřebné množství záměsové vody. Snižování však není příliš výrazné.



**Obrázek 12.14 Výsledky pevností v tlaku směsí na bázi písčité zeminy, 2 % cementu, 1,5 % vápna a plast. Sika ViscoCrete - 1062**

Vlivem plastifikační přísady bylo dosaženo rychlejší zatvrdnutí směsi a bylo možné zkoušet pevnost v tlaku po 7 dnech. U směsi bez plastifikační přísady k zatvrdnutí během 7 dní nedošlo. Z toho lze usoudit, že Sika ViscoCrete – 1062 urychluje tvrdnutí vzorků. Výsledné pevnosti dosahovaly podobných hodnot jako u vzorků bez zkoumané plastifikační přísady. Množství plastifikační přísady mírně ovlivnilo pevnosti v tlaku u zkoušených směsí, což bylo nejspíše způsobeno redukcí záměsové vody.



**Obrázek 12.15 Hodnoty objemové hmotnosti čerstvé a zatvrdlých směsí na bázi písčité zeminy, 2 % cementu, 1,5 % vápna a plast. Sika ViscoCrete – 1062**

S vyšším množstvím plastifikační přísady se mírně zvyšují objemové hmotnosti. Tato skutečnost může být způsobena nižším množstvím záměsové vody u rostoucího množství plastifikační přísady.

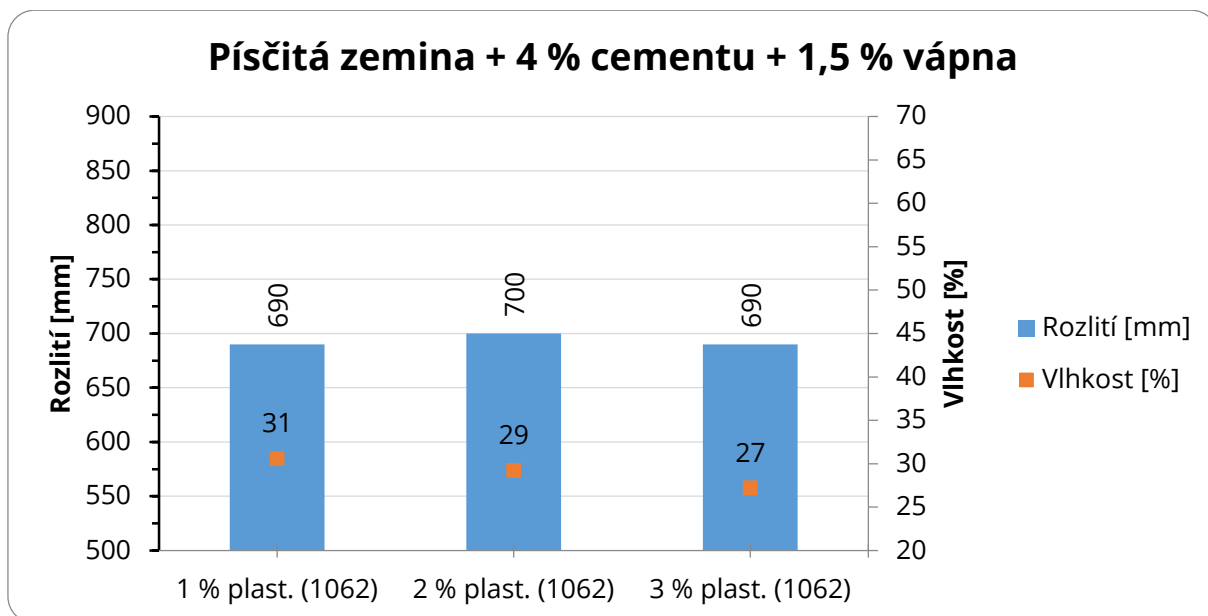
Hodnoty smrštění byly mírně vyšší, než u směsi bez plastifikační přísady. To však mohlo být způsobeno nepřesností forem. Vzorky po 56 dnech dosahovaly nižší vlhkosti po přidání plastifikační přísady. Po zamíchání docházelo pouze k malé dekantaci.

**Tabulka 12.5 Hodnoty smrštění a vlhkosti směsí na bázi písčité zeminy, 2 % cementu, 1,5 % vápna a plast. Sika ViscoCrete - 1062**

Směs	Smrštění [%]				Vlhkost [%]				
	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní	Při míchání	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 1 % plast. (1062)	-0,1	0,0	0,6	0,6	27,3	18,5	8,8	5,5	7,0
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 2 % plast. (1062)	0,1	0,3	0,7	0,4	25,8	17,7	7,8	5,9	5,3
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 3 % plast. (1062)	0,1	0,6	0,5	-0,6	24,7	14,3	5,5	6,0	5,8

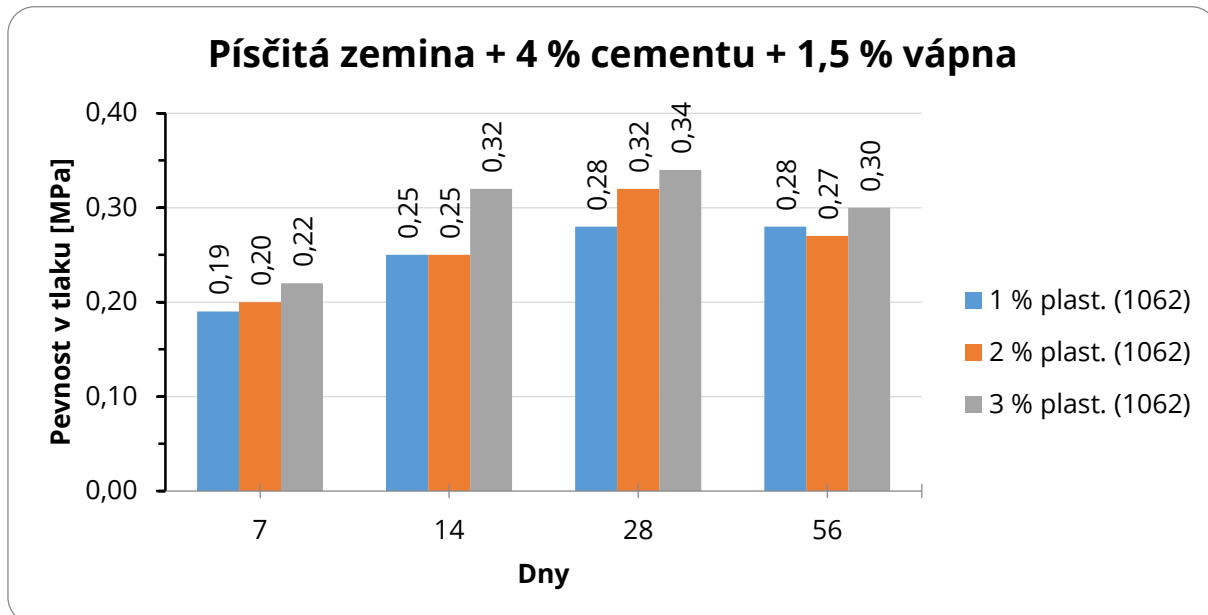
## 12.6 ZKOUŠENÍ SMĚSÍ PÍŠČITÉ ZEMINY S 1,5 % VÁPNA, 4 % CEMENTU A PLASTIFIKAČNÍ PŘÍSADOU SIKA VISCOCRETE – 1062

Plastifikační přísada Sika ViscoCrete - 1062 byla vybrána také pro směs písčité zeminy, 4 % cementu a 1,5 % vápna. Nutno podotknout, že dvojnásobné množství cementu zapříčiní přidání dvojnásobného množství plastifikační přísady, aby bylo zachované procentuální dávkování.



**Obrázek 12.16 Závislost rozlité na vlhkosti směsi na bázi písčité zeminy, 4 % cementu, 1,5 % vápna a plast. Sika ViscoCrete – 1062**

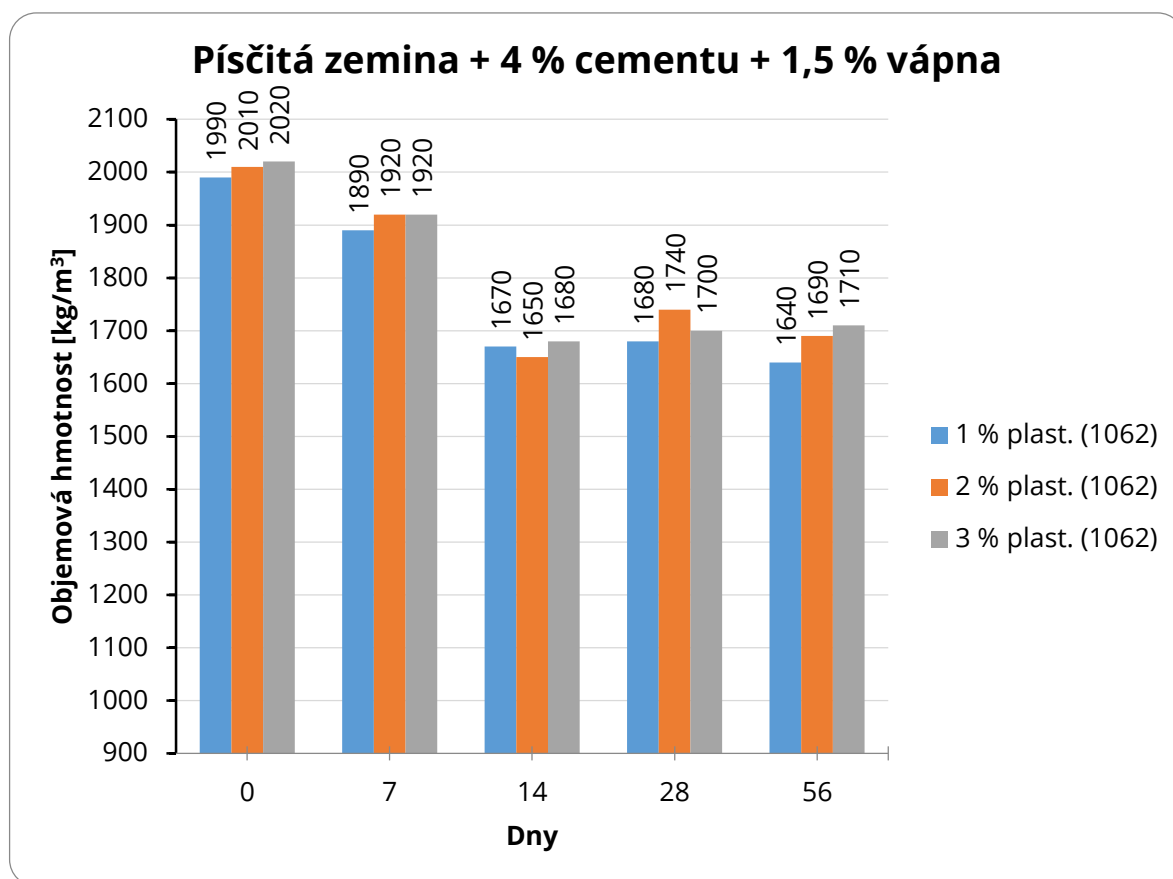
Navzdory předpokladu Sika ViscoCrete – 1062 u písčité zeminy se 4 % cementu a 1,5 % vápna snížil rozlité směsi oproti obdobnému kompozitu bez plastifikační přísady. Další přidávání plastifikační přísady již snižovalo potřebné množství záměsové vody.



**Obrázek 12.17 Výsledky pevností v tlaku směsí na bázi písčité zeminy, 4 % cementu, 1,5 % vápna a plast. Sika ViscoCrete - 1062**

Sika ViscoCrete – 1062 zvyšoval hodnoty pevnosti v tlaku u přidaného 1 %, 2 % i 3 % z hmotnosti cementu oproti obdobné směsi bez přidané plastifikační přísady.

Vyšší množství plastifikační přísady také způsobovalo vyšší nárůst pevností. Z Obrázku 12.17 se jeví, že po 14 dnech se již pevnost v tlaku u zkoumaných vzorků příliš nemění.



**Obrázek 12.18** Hodnoty objemové hmotnosti čerstvé a zatvrdlých směsí na bázi písčité zeminy, 4 % cementu, 1,5 % vápna a plast. Sika ViscoCrete – 1062

Zkoumaná plastifikační přísada neměla výrazný vliv na objemové hmotnosti u směsi písčité zeminy 4 % cementu a 1,5 % vápna. Vyšší podíl Sika ViscoCrete – 1062 způsobil mírné navýšení objemových hmotností.

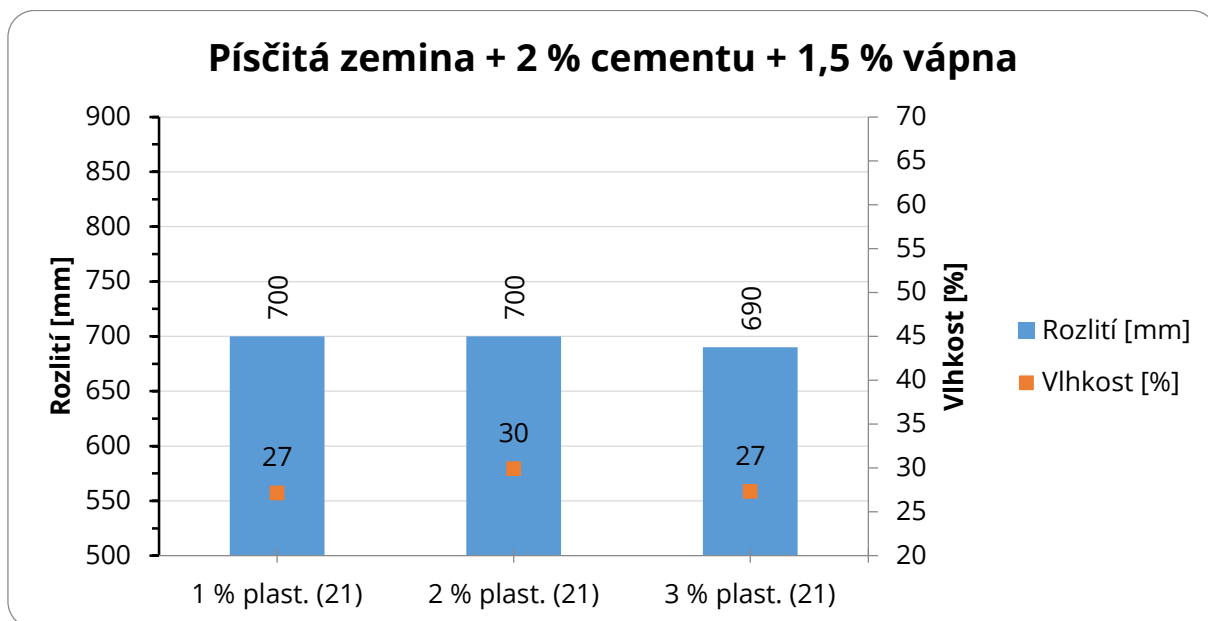
Plastifikační přísada zásadně neovlivnila objemovou stálost směsí.

**Tabulka 12.6** Hodnoty smrštění a vlhkosti směsí na bázi písčité zeminy, 2 % cementu, 1,5 % vápna a plast. Sika ViscoCrete – 1062

Směs	Smrštění [%]				Vlhkost [%]				
	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní	Při míchání	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní
P. zem. + 4 % cem. + 1,5 % váp. + 1 % plast. (1062)	0,6	0,3	0,5	0,3	30,6	20,8	9,3	10,5	10,0
P. zem. + 4 % cem. + 1,5 % váp. + 2 % plast. (1062)	-0,1	0,0	0,5	0,3	29,2	22,1	7,6	11,4	9,3
P. zem. + 4 % cem. + 1,5 % váp. + 3 % plast. (1062)	-0,4	0,0	-0,4	0,2	27,2	19,5	8,0	8,4	6,1

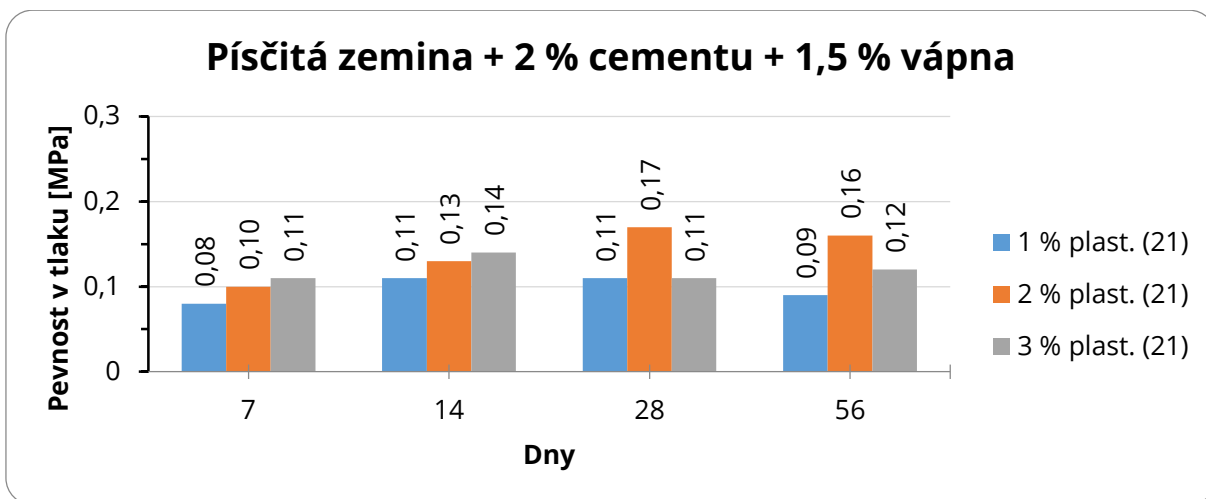
## 12.7 ZKOUŠENÍ SMĚSÍ PÍŠČITÉ ZEMINY S 1,5 % VÁPNA, 2 % CEMENTU A PLASTIFIKAČNÍ PŘÍSADOU SIKa VISCOCRETE – 21

V této kapitole bude zkoumána druhá plastifikační přísada, kterou je Sika ViscoCrete – 21. Ta se bude přidávat do směsi písčité zeminy, 2 % cementu a 1,5 % vápna.



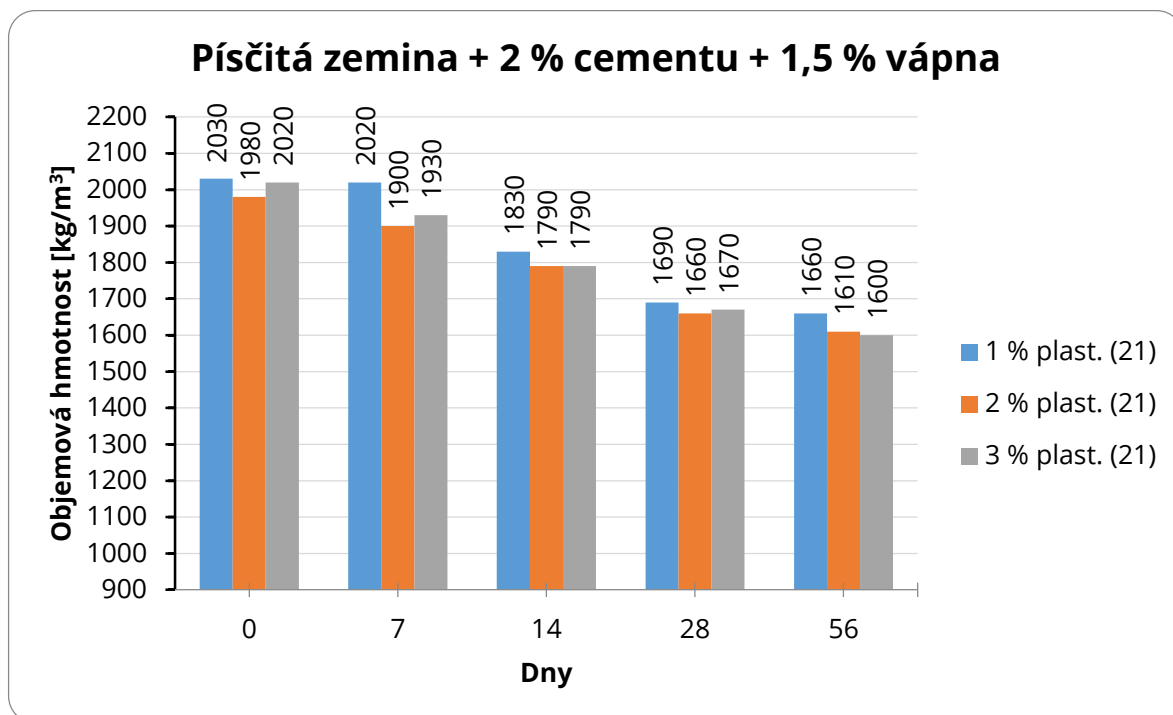
**Obrázek 12.19 Závislost rozlití na vlhkosti směsi na bázi písčité zeminy, 2 % cementu, 1,5 % vápna a plast. Sika ViscoCrete – 21**

Z výsledků uvedených na Obrázku 12.19 je zřejmé, že plastifikační přísada Sika ViscoCrete – 21 mírně zredukovala potřebné množství záměsové vody v písčité zemině. Nejlepšího výsledku bylo dosaženo při přídavku 1 % popisované plastifikační přísady. Vyšší množství již není výhodné použít, z důvodu vyššího množství záměsové vody.



**Obrázek 12.20 Výsledky pevností v tlaku směsí na bázi písčité zeminy, 2 % cementu, 1,5 % vápna a plast. Sika ViscoCrete - 21**

Vliv Sika ViscoCrete – 21 na pevnosti byl obdobný jako u Sika ViscoCrete – 1062. Bylo urychleno zrání vzorků a také byl zjištěn mírný nárůst pevnosti, jak oproti směsi s plastifikační přísadou popisovanou v předešlé kapitole, tak i bez ní. Vyšší množství Sika ViscoCrete – 21 způsobovalo vyšší pevnost v tlaku během prvních 14 dnů zrání. Po této době se jevílo, že přidáním 2 % Sika ViscoCrete – 21 je dosaženo nejvyšší pevnosti v tlaku.



**Obrázek 12.21 Hodnoty objemové hmotnosti čerstvé a zatvrdlých směsí na bázi písčité zeminy, 2 % cementu, 1,5 % vápna a plast. Sika ViscoCrete – 21**



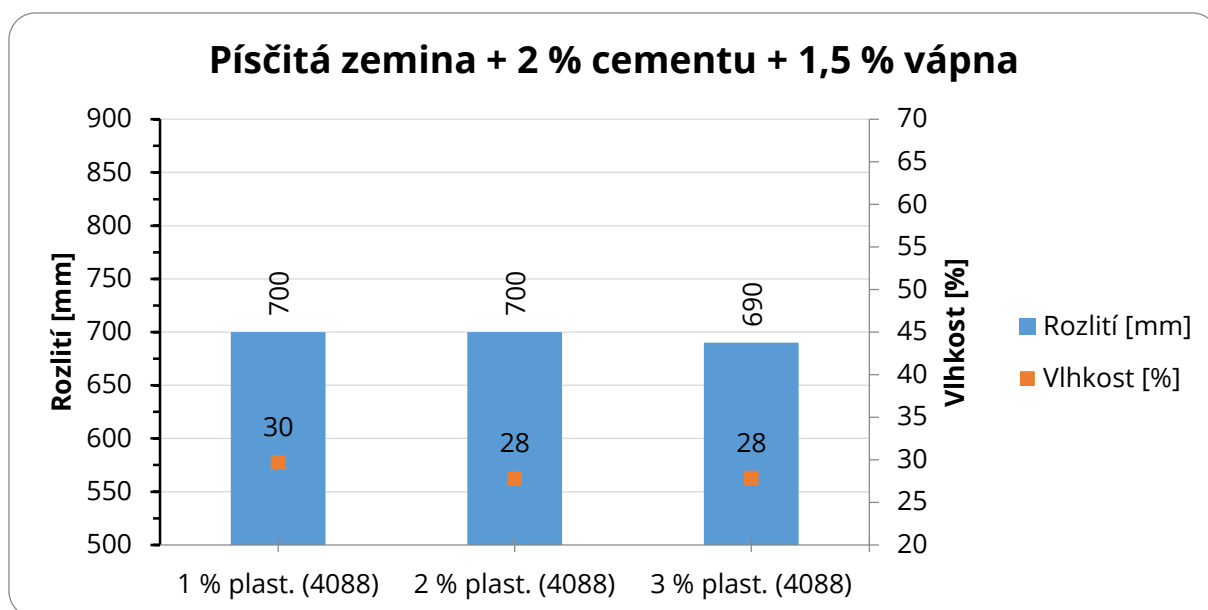
Z Obrázku 12.21 lze říci, že přidáním Sika ViscoCrete – 21 nebyly objemové hmotnosti příliš ovlivněny. Tabulka 12.7, ve které je popsáno smrštění a vlhkost vzorků, značí, že Sika ViscoCrete – 21 nemá vliv na smrštění a způsobuje nižší vlhkost v 56 dnech, než je pozorováno u směsi bez plastifikační přísady.

**Tabulka 12.7 Hodnoty smrštění a vlhkosti směsí na bázi písčité zeminy, 2 % cementu, 1,5 % vápna a plast. Sika ViscoCrete – 21**

Směs	Smrštění [%]				Vlhkost [%]				
	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní	Při míchání	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 1 % plast. (21)	1,7	0,1	-0,1	0,1	27,2	19,8	11,9	7,1	6,3
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 2 % plast. (21)	-0,3	0,3	0,2	0,3	29,9	22,0	15,1	8,1	7,3
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 3 % plast. (21)	0,1	0,7	0,5	0,5	27,3	21,3	12,8	7,2	4,4

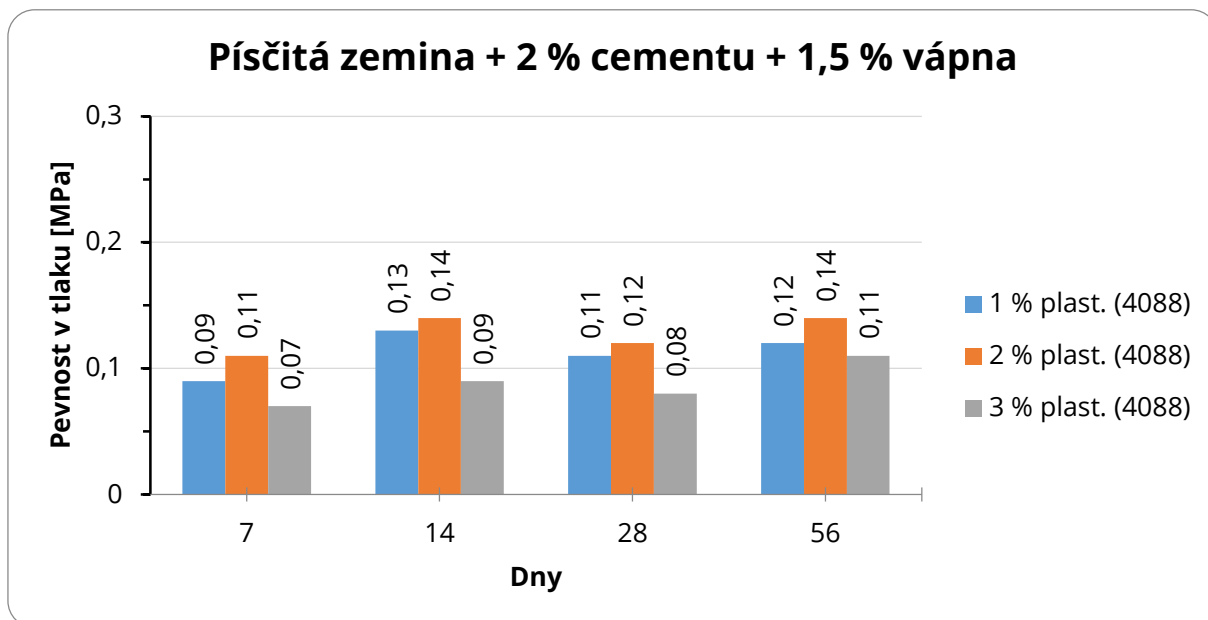
## 12.8 ZKOUŠENÍ SMĚSÍ PÍŠČITÉ ZEMINY S 1,5 % VÁPNA, 2 % CEMENTU A PLASTIFIKAČNÍ PŘÍSADOU SIKA VISCOCRETE – 4088

V této kapitole bude popsána poslední zkoumaná směs, tedy vliv plastifikační přísady Sika ViscoCrete - 4088 na směs písčité zeminy 2 % cementu a 1,5 % vápna.



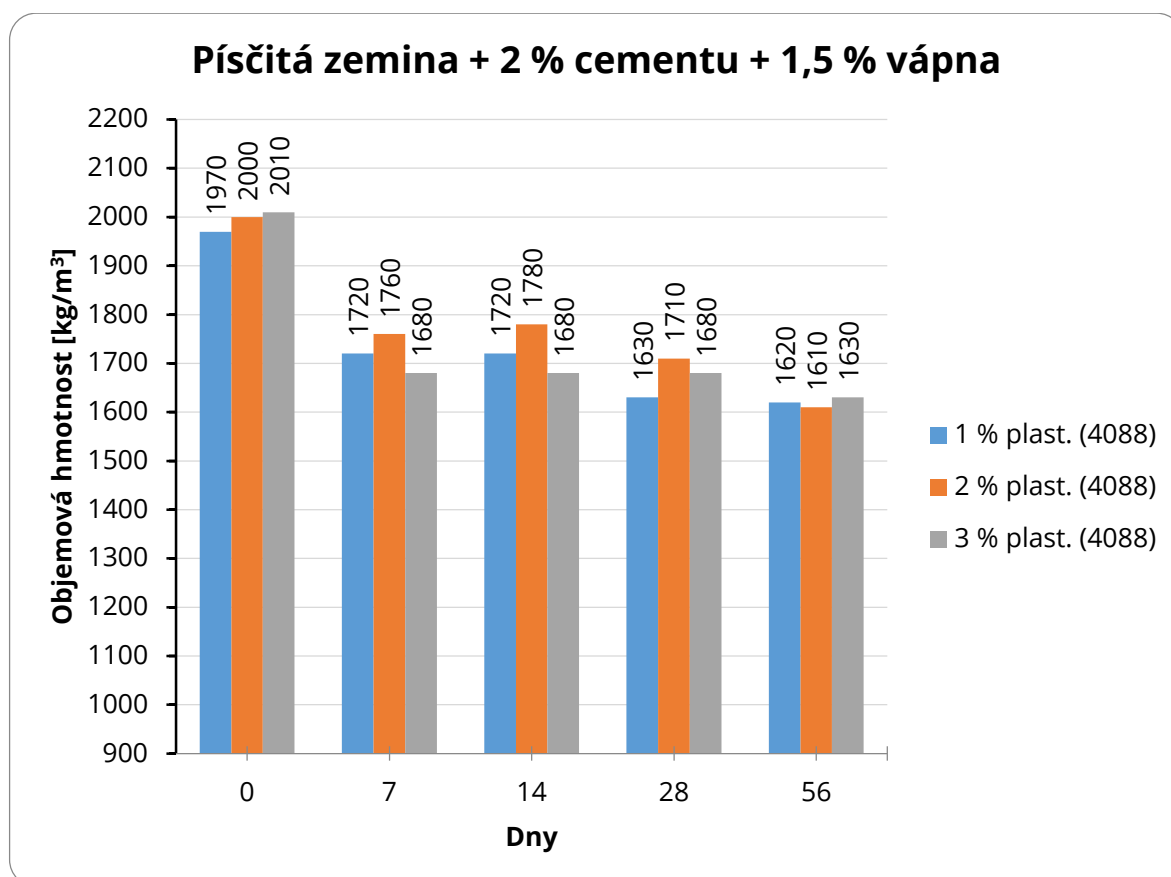
**Obrázek 12.22 Závislost rozlítí na vlhkosti směsí na bázi písčité zeminy, 2 % cementu, 1,5 % vápna a plast. Sika ViscoCrete – 4088**

Při zkoušení Sika ViscoCrete – 4088 na písčitou zeminu byl pozorován jen malý vliv na rozlití směsi. Dalo by se říct, že na reologické vlastnosti písčité zeminy se 2 % cementu a 1,5 % vápna má nejvyšší vliv přidání 2 % popisované plastifikační přísady.



**Obrázek 12.23 Výsledky pevností v tlaku směsí na bázi písčité zeminy, 2 % cementu, 1,5 % vápna a plast. Sika ViscoCrete - 4088**

Přidáním 2 % Sika ViscoCrete – 4088 do směsi písčité zeminy způsobily nejvyšší nárůst pevnosti. Nejnižší pevnosti byly dosaženy přidáním 3 % plastifikační přísady. Sika ViscoCrete – 4088 také způsobil rychlejší tvrdnutí směsi a výsledné pevnosti v tlaku dosahovaly vyšších hodnot než u směsí bez plastifikační přísady, či s přídavkem Sika ViscoCrete – 1062.



**Obrázek 12.24** Hodnoty objemové hmotnosti čerstvé a zatvrdlých směsí na bázi písčité zeminy, 2 % cementu, 1,5 % vápna a plast. Sika ViscoCrete - 4088

Objemové hmotnosti i při přidání Sika ViscoCrete – 4088 vykazovaly po 7 dnech zrání pokles, který byl způsoben odpařením vody. Z Tabulky 12.8 vyplývá, že dochází ke smrštění do 1 %. To může být způsobeno nepřesností použitých forem. Vysychání vzorků probíhalo rychleji než u předešlých kombinací a dosahuje po 56 dnech hodnot do 6 %. Zdá se, že vyšší množství Sika ViscoCrete – 4088 způsobilo snížení vlhkosti po 56 dnech.

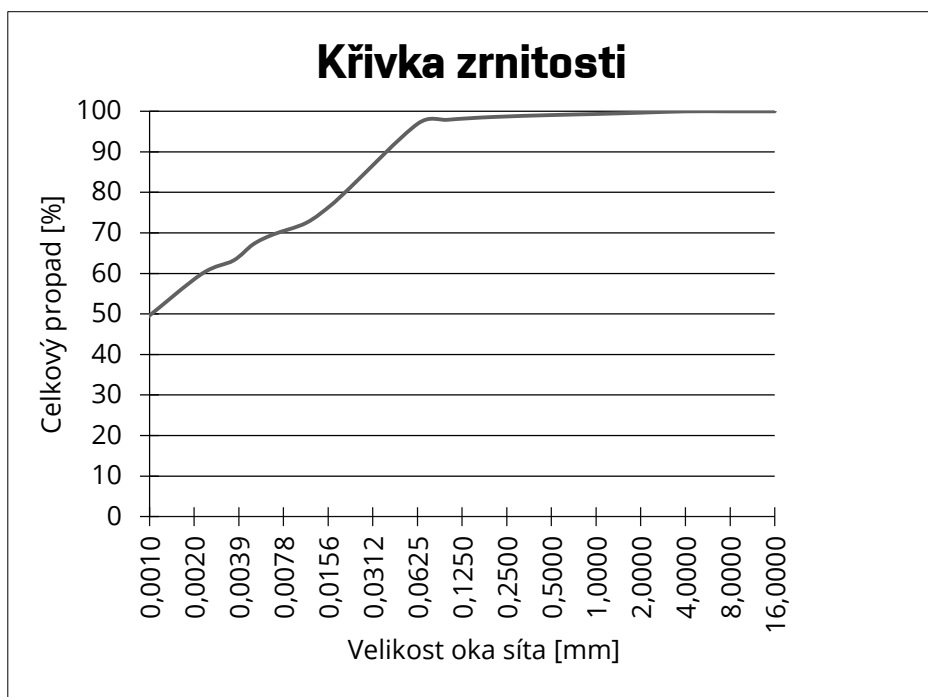
**Tabulka 12.8** Hodnoty smrštění a vlhkosti směsí na bázi písčité zeminy, 2 % cementu, 1,5 % vápna a plast. Sika ViscoCrete – 4088

Směs	Smrštění [%]				Vlhkost [%]				
	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní	Při míchání	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 1 % plast. (4088)	0,6	0,5	0,3	0,2	29,7	10,4	10,5	7,1	5,7
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 2 % plast. (4088)	0,6	0,3	0,9	0,5	27,8	10,7	12,9	6,7	4,6
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 3 % plast. (4088)	0,4	0,6	0,4	0,6	27,9	8,9	8,5	7,4	3,9

### 13 ETAPA 4 – OVĚŘENÍ TECHNOLOGIE V PRAXI

Po prozkoumání vlivů jednotlivých komponent směsi je vhodné vyzkoušet technologii v reálných podmínkách. Laboratorní prostředí představuje podmínky, jako jsou stálá teplota, vlhkost a vyšší přesnost dávkování, které jsou na stavbě těžce dosažitelné.

Ověření technologie v reálných podmínkách probíhalo v oblasti Brno-Husovice, která je součástí samosprávné městské části Brno-sever. Po detailním průzkumu zdejší zeminy se zjistilo, že se podle normy ČSN EN ISO 14688-2 [22] jedná o jíl (CI). Z křivky zrnitosti (Obrázek 13.1) lze vyčíst, že skoro 97 % hmotnosti mělo menší zrna než 0,063 mm.



**Obrázek 13.1 Křivka zrnitosti zeminy použité pro praktické ověření**

Dále podle vlastností přehledně popsanych v Tabulce 13.1 lze vyčíst, že zemina dosahovala meze tekutosti 54 % a meze plasticity 29,9 %. Číslo plasticity mělo hodnotu 24,1 %. Dle křivky zrnitosti lze také určit, že se jedná o nepropustnou zeminu. Číslo nestejnozrnitosti udává, že se jedná o nestejnozrnnou zeminu a číslo křivosti určuje, že zemina není dobře zrněná, nemá tudíž plynulou křivku zrnitosti. Vlhkost zeminy byla 25,4 %.

**Tabulka 13.1 Vlastnosti zeminy použité pro praktické ověření**

Název		jíl
Symbol		Cl
Podíl frakcí [%]	f (0-0,063 mm)	96,99
	s (0,063-2,0 mm)	2,68
	g (2,0-63 mm)	0,33
Průměry	d <sub>10</sub>	0,0009
	d <sub>30</sub>	0,0009
	d <sub>60</sub>	0,0022
Mez tekutosti	w <sub>L</sub> [%]	54,0
Mez plasticity	w <sub>P</sub> [%]	29,9
Číslo plasticity	I <sub>P</sub> [%]	24,1
Vlhkost zeminy	w [%]	25,4
Stupeň konzistence	I <sub>C</sub> [-]	1,19
Číslo nestejnozrnatosti	C <sub>U</sub> [-]	2,57
Číslo křivosti	C <sub>C</sub> [-]	0,39
Propustnost z křivky zrnitosti	k [m·s <sup>-1</sup> ]	9,320·10 <sup>-11</sup>

Ze zjištěných hodnot se určilo, že zeminu je třeba upravit. Úprava zeminy byla provedena pomocí cementu CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R ze závodu v Mokré od společnosti Českomoravský cement, a. s., hydroxidu vápenatého SuperCalco Cl 90 - S od firmy Carmeuse a plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 4088. Použité složení směsi bylo **4 % cementu, 1,5 % vápna a 1 % Sika ViscoCrete – 4088**.

Hmotnost zeminy byla odpočítána pomocí známého objemu vykopané zeminy a přibližnému určení objemové hmotnosti, pomocí objemu kbelíku. Ze spočítané hmotnosti zeminy se následně určilo množství 1,5 % vápna, u kterého byly pozorovány nejlepší výsledky. Vápno bylo k zemině přidáno den předem, aby došlo ke stabilizaci jílových minerálů. Dávkování vápna probíhalo ručně a následně se homogenizovalo pomocí hrábí a lopat (viz Obrázek 13.2). Zemina s vápnem byla uložena tak, aby se zamezilo možnému styku s deštěm.



**Obrázek 13.2 Dávkování a homogenizace vápna při praktickém ověření technologie**

Po realizaci výkopové rýhy o rozměrech 1,5 m × 0,4 m × 0,5 m, byla do výkopu vložena polymerní roura o průměru 125 mm, která simulovala vodovodní potrubí (viz Obrázek 13.3). Rouru bylo nutno zajistit z důvodu vysoké vztlakové síly vyvíjené ztekucenou zeminou.



**Obrázek 13.3 Připravený výkop s vloženou rourou**



Následovalo míchání směsi, které probíhalo v míchačce s nuceným oběhem typu M 180 COM-F od společnosti Filamos s.r.o. (Obrázek 13.4). Pro jílovitou zeminu by dle kapitoly 11.2 stačilo již přidání 2 % cementu pro dosažení požadované pevnosti, ale z důvodu nízké teploty na staveništi (6 °C) bylo zvoleno množství cementu 4 %. Po zamíchání zeminy s cementem byla do míchačky přidána voda pro ztekucení a následně plastifikační přísada.



**Obrázek 13.4 Míchání směsi v míchačce s nuceným oběhem typu M 180 COM-F**

Na čerstvé směsi se zjišťovalo pouze rozlití dle [27], které vyšlo **700 mm**, což odpovídá zatřídění **SF2** (Obrázek 13.5). Daného rozlití bylo dosaženo již při vodním součiniteli **0,43**.



**Obrázek 13.5 Zkouška sednutí-rozlitím dle [27] prováděná při praktickém ověření**

Po provedení zkoušky sednutí-rozlítím byl odebrán materiál (Obrázek 13.6) ke zhotovení zkušebních těles o rozměru 100 × 100 × 100 mm, na kterých bude vykonána zkouška pevnosti v tlaku dle [49]. Zkušební tělesa dosahovala pevnosti v tlaku **po 7 dnech** zrání **0,3 MPa** a **po 14 dnech** zrání **0,4 MPa**. Tyto výsledky odpovídají pevnosti získané během laboratorního šetření.



**Obrázek 13.6 Odběr materiálu pro stanovení pevnosti v tlaku dle [49]**

Plnění výkopu probíhalo pomocí stavebního kolečka, kterým se převážela směs od míchačky (Obrázek 13.7). Během plnění směs plynule obtekla simulovanou inženýrskou sít, tudíž se dá praktické ověření pokládat jako úspěšné.



**Obrázek 13.7 Plnění výkopu**



## 14 SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ

V této kapitole budou shrnuty výsledky a poznatky, které se u zkoumaných směsí opakovaly. Výsledné hodnoty jsou popsány v následujících tabulkách (Příloha 1 a Příloha 2). Jedná se o rozlití, vlhkost potřebou k danému rozlití, pevnost v tlaku po 7, 14, 28 a 56 dnech, objemové hmotnosti a objemové změny.

Jednou z nejdůležitějších pozorovaných vlastností je hodnota **rozlití** směsi. Snahou bylo dosáhnout kategorie podle zkoušky sednutí-rozlitím SF2, tedy 650 – 750 mm. Již při míchání byl znát rozdíl mezi jílovitou a písčitou zemínou. Míchání směsí v laboratoři probíhalo pomocí ruční míchačky. Jílovitá zemina (Obrázek 14.1) měla tendenci se po přidání vody lepit a tvořit těžce rozpojitelné celky, do kterých se již voda nedostala. Ty byla potřeba rozpojovat ručně. U písčité zeminy (Obrázek 14.2) se takový problém nevyskytoval. U jílovité zeminy bylo potřeba přidání většího množství vody (vodní součinitel 34 – 60 %), než u písčité zeminy (vodní součinitel 27 – 31 %). Na rozlití směsi měl také vliv čas míchání. Při delším míchání docházelo k lepšímu promísení jílovité zeminy a vody, tím pádem zemina pojmla větší množství vody a rozlití se snížilo. Po přidání pojiv docházelo k okamžité reakci, za vzniku hydratačních produktů. Ne vždy se však povedlo odhadnout konzistenci na první pokus, tím docházelo k delší době míchání a k mírnému zkreslení výsledků. Převážně u písčitých směsí docházelo k dekantaci vody, která během uložení vlivem netěsnosti forem samovolně odtékala.

Nutno podotknout, že plastifikační přísady měly na rozlití jílovité zeminy špatný vliv. Docházelo k větší dispergaci částic, která způsobila hladší směs a tím pádem více zrn schopných navázat vodu. U písčité zeminy plastifikační přísada snížila množství záměsové vody nejvíce o 6 % oproti referenční směsi, průměrně však o 2 – 3 %. Nejlepší vliv plastifikační přísady byl pozorován u Sika ViscoCrete – 1062 přidané do směsi písčité zeminy, 2 % cementu a 1,5 % vápna.



**Obrázek 14.1 Příklad rozlití jílovité zeminy**



**Obrázek 14.2 Příklad rozlití písčité zeminy**

Další důležitou vlastností je **pevnost v tlaku**. Na tento parametr mělo největší vliv množství přidaného cementu a složení zeminy. U jílovité zeminy byla při obsahu cementu do 2 % hmotnosti pozorována vyšší pevnost v tlaku než u písčité zeminy. Tento jev je důsledkem zrnitosti porovnávaných zemin, kde jílovitá zemina dosahuje sama o sobě vyšší únosnosti než zemina písčitá. Největší vliv na pevnost v tlaku však mělo množství přidaného cementu. Zvoleným množstvím lze pevnost v tlaku zeminy přizpůsobit podle potřeby. U vyhloubitelných zemin, kde se požaduje pevnost v tlaku přibližně 0,2 – 0,3 MPa by u jílovitých zemin mělo stačit za normálních podmínek přidat 2 % cementu. U písčitých zemin, z důvodu jejich nízké únosnosti, bych doporučil volit spíše 4 % cementu. Vyšší množství bych, z důvodu vyšší ekonomické zátěže, doporučil pouze u aplikace, která vyžaduje vyšší pevnost v tlaku materiálu, například pod pozemní komunikace. U písčitých zemin s množstvím cementu do 2 % nebylo možné zkoušet pevnost v tlaku, jelikož nedošlo kvůli vyšší vlhkosti k zatvrdnutí. Tento jev byl pozorován také u směsi jílovité zeminy a 2 % cementu. U vzorků byl často pozorován pokles pevnosti v tlaku mezi 28 a 56 dnů. Tento pokles byl zřejmě způsoben přílišným vysušením vzorků a manipulací. Po dosažení určité vlhkosti se vzorky začaly během neopatrné manipulace drobit (viz Obrázek 14.3). V praxi by však při použití ztekucených zemin do výkopu byla zajištěna ochrana proti nadměrnému vysychání.



**Obrázek 14.3 Ukázka drolení vzorku během manipulace**

Plastifikační přísady měly na vývin pevnosti pozitivní vliv. U jílovitých zemin to bylo způsobeno lepší distribucí vody a u písčitých zemin snížením vodního součinitele. U plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062 byl, při použití na jílovité zemině, pozorován rychlejší nárůst pevností a bylo spotřebováno méně vody. U písčité zeminy snížila množství potřebné záměsové vody, ale pevnosti neovlivnila. Sika ViscoCrete – 21 způsobil u jílovité zeminy vyšší potřebné množství záměsové vody a zvýšil dlouhodobou pevnost, u písčité zeminy byl pozorován úbytek množství záměsové vody (nižší než u Sika ViscoCrete – 1062) a vyšší pevnost v tlaku. Vliv Sika ViscoCrete – 4088 je podobný jako u Sika ViscoCrete – 21. U zkoumaného množství plastifikační přísady nebyl pozorován zásadní rozdíl, tudíž bych doporučil použití 1 % z hmotnosti zeminy.

U jílovité směsi, kde byly přidány pouze 2% cementu, byl pozorován nezvyklý nárůst pevnosti po 28 a 56 dnech zrání. Vzhledem k absenci vápna a smrštění 12,6 % se předpokládá, že došlo k přeměně struktury na molekulární úrovni.

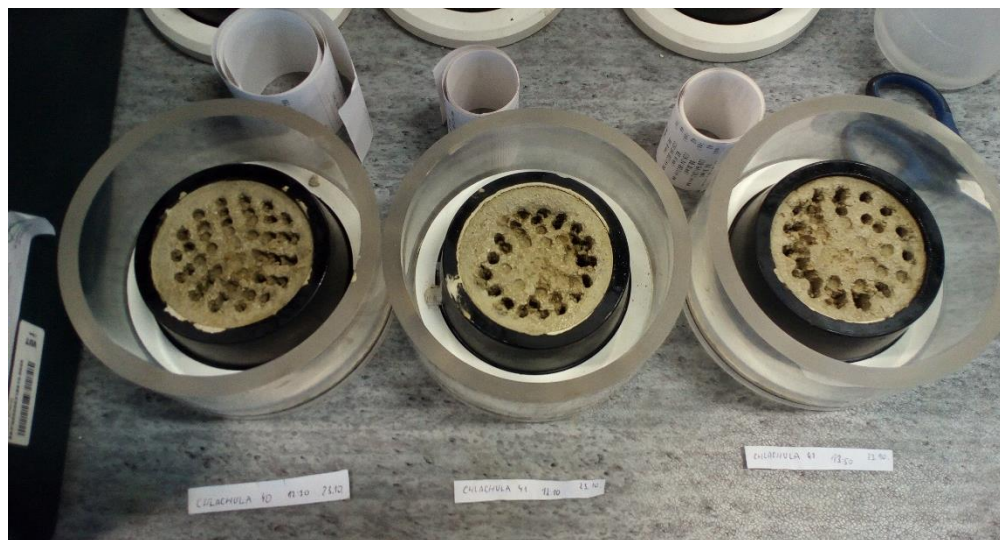
Vlivem vysychání vzorků dochází ke změně **objemové hmotnosti** (Příloha 3 a Příloha 4). Objemové hmotnosti směsi jílovité zeminy ve ztekuceném stavu se pohybovaly v rozmezí 1600 – 1780 kg/m<sup>3</sup> a u písčité zeminy bylo rozmezí 1970 – 2080 kg/m<sup>3</sup> v závislosti na množství přidané vody. Po 56 dnech uložení v laboratorních podmínkách vzorky jílovité zeminy dosahovaly objemové hmotnosti okolo 1330 kg/m<sup>3</sup> a vzorky písčité zeminy okolo 1660 kg/m<sup>3</sup>. Vliv pojiv a plastifikačních přísad na objemové hmotnosti byl zanedbatelný. Jak bylo popisováno dříve, jediná výjimka byla pozorována u směsi jílovité zeminy a 2 % cementu, kde došlo ke změně struktury na molekulární úrovni. Vyšší objemové hmotnosti znamenají vyšší hmotnost materiálu a vyšší vztahové síly na inženýrské sítě, proto je nutné inženýrské sítě zajistit proti deformaci, či vyplavání.

Vlivem vysychání také dochází k **objemovým změnám** (Příloha 5 a Příloha 6) a tvorbám prasklin. Obecně lze říci, že jílovité zeminy byly náchylné na objemové změny, přesněji smrštění. Tento jev se do jisté míry podařilo omezit pomocí vápna, které stabilizovalo jílové minerály mající sklon měnit objem podle vlhkosti. Stabilizace se dalo dosáhnout také přidáním 4 % a více cementu, který v takovém množství vytvářel již dostatečně pevnou strukturu. Vlivem vysychání a smrštění se u jílovitých zemin tvořily smršťovací praskliny. Písčité zeminy dosahovaly hodnot smrštění do 1 %, tudíž nebyly



únikem vody po objemové stránce příliš ovlivněny. Hodnoty smrštění mohly být zkresleny v řádech desetin procent vlivem nepřesností forem. Plastifikační přísady neměly na objemové změny zásadní vliv.

Během zkoušení **doby tuhnutí** dle kapitoly 9.2.2 bylo zjištěno, že měření těchto směsí je velmi nepřesné. Ve směsích byly obsaženy zrna většího průměru, o které se jehla mohla zastavit, či naopak měkká místa, která způsobila větší zaboření jehly. Samotná hmotnost Vicatovi jehly byla na nízké pevnosti tuhnoucích směsí poměrně vysoká. Po mnoha pokusech bylo zjištěno, že kvůli dlouhým dobám tvrdnutí byly jen vzácně zachyceny jak počátky, tak konce doby tuhnutí. Na délku doby tuhnutí mělo vliv hlavně použité množství záměsové vody a typ zeminy. Podařilo se určit, že jílovité zeminy měly dobu tuhnutí dlouhou přibližně 29 hodin při vodním součiniteli do 0,5. Pokud byl vodní součinitel navýšen na 0,6, doba tuhnutí vycházela na 40 hodin. U písčitých zemin, kde byl stabilnější vodní součinitel, docházelo ke konci doby tuhnutí po 28 hodinách. Vyšší množství plastifikační přísady zkrátilo dobu tuhnutí o 1 až 2 hodiny. Vzorky po ukončení stanovení doby tuhnutí znázorňuje Obrázek 14.4.



**Obrázek 14.4 Ukázka vzorků po stanovení doby tuhnutí**

## 15 ZÁVĚR

Předmětem diplomové práce bylo navrhnout a ověřit ztekucení zemin umožňující jejich zpětné využití ve stabilní tekuté formě s použitím stabilizačních přípravků a ztekucujících přísad.

Tato práce se zabývala zejména vlivem nejzákladnějších stabilizačních příměsí, tedy vápna a cementu. Obecně lze říci, že vyšší množství stabilizačních příměsí či přísad způsobuje zhoršení reologických vlastností z důvodu využití vody pro jejich hydrataci. Vliv vápna byl pozorován zejména u jílovitých zemin, kde pomocí změn struktur jílových minerálů způsoboval především omezení objemových změn. U písčitých zemin vápno nemělo výrazný vliv, nicméně obecně bych doporučil jeho použití, a to z důvodu častého výskytu malého množství jílovité přímíseniny. Vliv cementu na zeminy spočíval především ve tvoření hydratačních produktů, které postupem času vykrystalovaly a formovaly mřížku, tvořící základ pro vývoj pevnosti vzorků. Pomocí zvyšujícího se množství cementu lze dosáhnout pevnosti v tlaku, která je potřebná pro danou aplikaci. Snahou však je přiblížit se pevnostem uložené zeminy, která činí přibližně 0,2 – 0,3 MPa.

Jako ztekucující přísady byly zkoumány plastifikační přísady na bázi roztoků modifikovaných polykarboxylátů od firmy Sika AG. Plastifikační přísady u jílovitých zemin způsobovaly větší dispergaci částic, což se projevilo hladší směsí, a tím pádem více zrn bylo schopných navázat vodu. To mělo za následek vyšší potřebu záměsové vody. Plastifikační přísady u jílovitých zemin způsobovaly vyšší konečné pevnosti vzorků, které měly rychlejší nárůst. U písčitých zemin byla pozorována redukce potřebné záměsové vody a vyšší konečné pevnosti. Množství plastifikační přísady bych z ekonomických důvodů a malého rozdílu výsledků doporučil na 1 % z hmotnosti použitého cementu.

Jako nejvhodnější složení směsi pro ztekucené jílovité zeminy byla zvolena kombinace jílovité zeminy, 2 % cementu, 1,5 % vápna a 1 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062. Tato kombinace dosahovala požadované pevnosti v tlaku (po 28 dnech 0,25 MPa), vhodného rozlití (SF2 při vodním součiniteli 0,48) a smrštění 3 %.

Pro písčitou zeminu bylo zvoleno nejvhodnější složení 4 % cementu, 1,5 % vápna a 1 % plastifikační přísady Sika ViscoCrete – 1062. Při zkoumání této směsi byla stanovena pevnost v tlaku po 28 dnech 0,28 MPa, rozlití SF2 při vodním součiniteli 0,31 a smrštění 0,5 %.

Oblast využití ztekucených zemin ve formě zpětné samozhutnitelné zálivky je perspektivní z důvodu využitelnosti výkopové zeminy. Vzhledem k dosavadnímu výzkumu je zde ještě mnoho vlivů a možností, které je potřeba prozkoumat. Pro další šetření by byla vhodná například využitelnost vysokoteplotního popílku, která nebyla z důvodu obsáhlosti práce zkoumána.

## 16 ZDROJE

- [1] 13. METODICKÝ POKYN MŽP pro průzkum kontaminovaného území.
- [2] ČSN EN ISO 14688-1 Geotechnický průzkum a zkoušení - Pojmenování a zařizování zemin - Část 1: Pojmenování a popis.
- [3] *Zemina - Tříděná zemina - Hlína - Ornice - NAD Končice s.r.o.* [online]. [cit. 20.10.2017]. Dostupné z: <http://www.zemina-ornice-nad.cz/slovník/hlina>.
- [4] Zákon č. 185/2001 Sb., Zákon o odpadech.
- [5] Zákonné nakládání s odpadními výkopovými zeminami POHLED KONTROLNÍHO ORGÁNU: Třetí Ruka. *Třetí Ruka* [online]. [cit. 29.11.2017]. Dostupné z: <http://www.tretiruka.cz/news/zakonne-nakladani-s-odpadnimi-vykopovymi-zeminami-pohled-kontrolniho-organu/>.
- [6] Vyhláška č. 294/2005 Sb., Vyhláška o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady.
- [7] Vyhláška č. 93/2016 Sb., Vyhláška o Katalogu odpadů.
- [8] ŠŤASTNÁ, J. Odpady. *Odpady* [online]. 2010 [cit. 26.10.2017]. Dostupné z: <http://odpady-online.cz/odpad-vedlejsi-produkt-vyrobek>.
- [9] Vyhláška č. 383/2001 Sb., Vyhláška Ministerstva životního prostředí o podrobnostech nakládání s odpady.
- [10] Zákon č. 183/2006 Sb., Zákon o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon).
- [11] TP 146 Povolování a provádění výkopů a zásypů rýh pro inženýrské sítě ve vozovkách pozemních komunikací.
- [12] Zákon č. 13/1997 Sb., Zákon o pozemních komunikacích.
- [13] Vyhláška č. 104/1997 Sb., Vyhláška Ministerstva dopravy a spojů, kterou se provádí zákon o pozemních komunikacích.
- [14] ČSN 73 6005 Prostorové uspořádání sítí technického vybavení.
- [15] Geologické a geovědní mapy [online] *Geologie, radon a geologická mapa: Město Brno*. [cit. 26.10.2017]. Dostupné z: <http://www.geologicke-mapy.cz/regiony/ku-610003/#mapy-online>.
- [16] Rock Picker, Flexxifinger. *Flexxifinger, Home* [online]. Copyright © 2018 Flexxifinger QD Industries Inc. [cit. 07.01.2018]. Dostupné z: <http://flexxifinger.com/Farm-Machinery/Rock-Picker>.
- [17] DIGGA - *Machinery attachments*. Rock bucket. [online]. COPYRIGHT © 2017 Dostupné z: <http://www.digga.com/rock-bucket.html>.
- [18] Flexxifinger® Quicker Picker in Action - YouTube. YouTube [online]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=JXkOoXesjxo>.
- [19] Třídíče [online]. Copyright © [cit. 07.01.2018]. Dostupné z: <http://tridicky.cz/e12/foto/Obraz175.jpg>.
- [20] Home [online]. Copyright © [cit. 07.01.2018]. Dostupné z: <http://www.packogreen.be/sites/default/files/p3170572.jpg?slideshow=true&slideshowAuto=false&slideshowSpeed=4000&speed=350&transition=elastic>.
- [21] Naklápěcí rotátory [online] *Naklápěcí rotátory - ocelové zápěstí pro Vaše rypadlo*. cit. [12.12.2017]. Dostupné z: <http://www.naklapecirotatory.cz/index.php>.



- [22] ČSN EN ISO 14688-2 Geotechnický průzkum a zkoušení - Pojmenování a zařizování zemin - Část 2: Zásady pro zařizování.
- [23] ORUMS, GAPA cz a.s.. *GAPA cz a.s. - betonárny, váhy a kovovýroba* [online]. Copyright © 2018 [cit. 07.01.2018]. Dostupné z: <http://www.gapa-servis.cz/cs/michacka-orums>.
- [24] Beton - výroba, doprava a čerpání betonu. Betonárna STAPPA mix Brno. [online]. Copyright © 2018 [cit. 07.01.2018]. Dostupné z: <http://www.stappa.cz/index.html>.
- [25] Application Description. *Flowable Fill*. User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction - FHWA-RD-97-148. Home. Federal Highway Administration [online]. Copyright © 2018 [cit. 07.01.2018]. Dostupné z: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/app6.cfm>.
- [26] ADASKA, W. S. *Controlled low-strength materials*. Concrete International, 1997, str. 41-43.
- [27] ČSN EN 12350-8: Zkoušení čerstvého betonu - Část 8: Samozhutnitelný beton - Zkouška sednutí-rozlítím.
- [28] ASTM C143 - Standard Test Method for Slump Of Portland Cement Concrete
- [29] ASTM C939 - Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method).
- [30] CHLACHULA, J. *Využití ztekucených zemin ve formě zpětných samozhutnitelných zálivek*. Brno, 2016. 75 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA.
- [31] BASHA, E. A., et al. *Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement*. Construction and Building Materials, 2005, 19.6: 448-453.
- [32] AL-RAWAS, A. A., GOOSEN, M. FA (ed.) *Expansive soils-Recent advances in characterization and treatment*. Taylor & Francis, 2006.
- [33] SHERWOOD, P. T. *Soil stabilization with cement and lime*. State of art Review. London: Transport Research Laboratory, 1993, HMSO, 153 p. ISBN: 0-11-551190-3.
- [34] ROGERS, C.D.F., GLENDINNING, S. *Modification of clay soils using lime*. Lime Stabilization. Thomas Telford, London, 1996, 99-112.
- [35] EuroSoilStab. *Development of Design and Construction Methods to Stabilise Spft Organic Soils*. Design Guide Soft Soil Stabilisation. CT97-0351, 2002, European Commission Project BE 96-3177.
- [36] HICKS, R. *Alaska Soil Stabilization Design Guide*. Alaska Department of Transportation and Public Facilities, Research and Technology Transfer, 2002.
- [37] INGLES, O., METCALF, J. *Soil stabilization: principles and practice*. 1972, 374 p. ISBN 04-094-8215-3.
- [38] BELL, F. G. *Ground Engineer's Reference Book*. London, Boston: Butterworths, 1987, 800 p. ISBN 978-0408011730.
- [39] MACLAREN D. C., WHITE M. A. *Cement: Its chemistry and properties*. Journal of Chemical Education, 2003.

- [40] AL-TABBAA A., STEGEMANN, J. A. (ed.). *Stabilisation/Solidification Treatment and Remediation: Proceedings of the International Conference on Stabilisation/Solidification Treatment and Remediation*, 12-13 April 2005, Cambridge, UK. CRC Press, 2005.
- [41] BHUVANESHWARI, S., ROBINSON, R. G., GANDHI, S. R. *Stabilization of expansive soils using fly ash*. Fly Ash India, 2005, 8: 5.1-5.10.
- [42] MACKIEWICZ, S. M., FERGUSON, E. G. *Stabilization of soil with self-cementing coal ashes*. World of Coal Ash (WOCA), 2005, 1-7.
- [43] WHITE, D. J., et al. *Fly ash soil stabilization for non-uniform subgrade soils*. 2005.
- [44] SOKOLÁŘ, R. *Keramika/Modul BJ01-M01*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2006. 176 s.
- [45] MAKALOUŠKOVÁ, E. *Adsorpce chemických modifikujících přísad na jednotlivé minerální komponenty betonových směsí.*, Brno 2005.
- [46] SOKOLÁŘ, R., NEVŘIVOVÁ, L., VODOVÁ, L., GRYGAROVÁ, S. *Žárovzdorné jíly v ČR a metodika posuzování jejich vlastností*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2012, 183 s. ISBN 978-80-7204-817-5.
- [47] WEIGLOVÁ, K. *Mechanika zemin: Vlastnosti zemin*, Studijní opory pro studijní program s kombinovanou formou studia. MODUL BF02-M02. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2005, 43 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 978-80-7204-507-5.
- [48] ČSN EN 196-3 *Metody zkoušení cementu - Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti*.
- [49] ČSN EN 12390-3 *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*.
- [50] ČSN 72 1019 *Laboratorní stanovení smršťování zemin*.
- [51] ČSN EN 1008 (732028) *Záměsová voda do betonu - Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu*.
- [52] Sika CZ, s.r.o. Česká republika. *Stavební chemie, průmyslové tmely a lepidla*. Sika CZ, s.r.o. [online]. Copyright © 2018 [cit. 07.01.2018]. Dostupné z: [https://cze.sika.com/cs/produkty\\_a\\_reseni/stavebnictvi/02a001/02a001sa01/02a001sa01ssa02.html](https://cze.sika.com/cs/produkty_a_reseni/stavebnictvi/02a001/02a001sa01/02a001sa01ssa02.html).

## SEZNAM ZKRATEK

KÚ...	Krajský úřad
MŽP...	Ministerstvo životního prostředí
ČIŽP...	Česká inspekce životního prostředí
As...	Arsen
Cd...	Kadmium
Cr...	Chrom
Hg...	Rtuť
Ni...	Nikl
Pb...	Olovo
V...	Vanad
BTEX...	Suma benzenu, toluenu, ethylbenzenu a xylenu
PAU...	Polycyklické aromatické uhlovodíky
EOX...	Extrahovatelné organicky vázané halogeny
PCB...	Polychlorované bifenyly
PK...	Pozemní komunikace
IS...	Inženýrské sítě
ASTM...	American Society for Testing and Materials
CLSM...	Controlled Low Strength Material
CaO...	oxid vápenatý (pálené vápno)
Ca(OH) <sub>2</sub> ...	hydroxid vápenatý (hašené vápno)
C <sub>3</sub> S...	Trikalcium silikát - 3·CaO·SiO <sub>2</sub> (alit)
C <sub>2</sub> S...	Dikalcium silikát - 2·CaO·SiO <sub>2</sub> (belit)
SiO <sub>2</sub> ...	Oxid křemičitý
τ ...	smykové napětí [Pa]
γ ...	smyková rychlost [s <sup>-1</sup> ]
ε ...	viskozita [Pa·s]
C <sub>U</sub> ...	Číslo nestejnozrnatosti
d <sub>10</sub> ...	Velikost zrn při 10% propadu [mm]
d <sub>60</sub> ...	Velikost zrn při 60% propadu [mm]
C <sub>C</sub> ...	Číslo křivosti
d <sub>30</sub> ...	Velikost zrn při 30% propadu [mm]
SCC...	Samozhutnitelný beton
d <sub>1</sub> , d <sub>2</sub> ...	Naměřené průměry rozteklého koláče [mm]
d ...	Průměr naměřených hodnot [mm]
f <sub>c</sub> ...	Krychelná pevnost v tlaku [MPa]
F ...	Síla potřebná pro porušení vzorku [kN]
A ...	Zatěžovaná plocha [mm]
S <sub>sl</sub> ...	Délkové (lineární) smrštění [%]
a ...	Původní rozměr [m]

$a_i \dots$	Nový rozměr [m]
$w_L \dots$	Mez tekutosti [%]
$w_P \dots$	Mez plasticity [%]
$I_P \dots$	Číslo plasticity [%]
$w \dots$	Vlhkost zeminy [%]
$I_C$	Stupeň konzistence [-]
$k \dots$	Propustnost z křivky zrnitosti [ $m \cdot s^{-1}$ ]

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1 - Rozlití, vlhkost a pevnost v tlaku - zemina a pojiva

Příloha 2 - Rozlití, vlhkost a pevnost v tlaku – zemina, pojiva a plastifikační přísada

Příloha 3 - Objemové hmotnosti směsí zeminy a pojiva

Příloha 4 - Objemové hmotnosti směsí zeminy, pojiv a plastifikační přísady

Příloha 5 - Smrštění a vlhkosti směsí zeminy a pojiva

Příloha 6 - Smrštění a vlhkosti směsí zeminy, pojiva a plastifikační přísady

## Příloha 1 - Rozlití, vlhkost a pevnost v tlaku - zemina a pojiva

**Tabulka 1 Rozlití, vlhkost a pevnost v tlaku - zemina a pojiva**

Směs	Rozlití [mm]	Vlhkost [%]	f <sub>c</sub> [Mpa]			
			7 denní	14 denní	28 denní	56 denní
Jílovitá zemina	670	34,2	nezatvrdlo	0,06	0,10	0,08
Jílovitá zemina + 0 % cementu + 1,5 % vápna	720	44,2	0,08	0,14	0,29	0,19
Jílovitá zemina + 0 % cementu + 3 % vápna	740	38,9	0,06	0,13	0,12	0,09
Jílovitá zemina + 2 % cementu + 0 % vápna	660	55,4	nezatvrdlo	0,14	0,21	0,24
Jílovitá zemina + 2 % cementu + 1,5 % vápna	860	47,6	0,10	0,21	0,20	0,23
Jílovitá zemina + 2 % cementu + 3 % vápna	760	38,9	0,11	0,20	0,21	0,11
Jílovitá zemina + 4 % cementu + 0 % vápna	740	51,6	0,16	0,26	0,38	0,27
Jílovitá zemina + 4 % cementu + 1,5 % vápna	800	34,3	0,19	0,36	0,29	0,34
Jílovitá zemina + 4 % cementu + 3 % vápna	850	38,9	0,14	0,23	0,33	0,22
Jílovitá zemina + 6 % cementu + 0 % vápna	750	50,2	0,25	0,50	0,40	0,28
Jílovitá zemina + 6 % cementu + 1,5 % vápna	680	34,3	0,37	0,50	0,60	0,24
Jílovitá zemina + 6 % cementu + 3 % vápna	820	38,9	0,22	0,44	0,46	0,29
Písčítá zemina	740	30,6	nezatvrdlo	nezatvrdlo	0,03	0,03
Písčítá zemina + 0 % cementu + 1,5 % vápna	730	30,6	nezatvrdlo	0,04	0,08	0,07
Písčítá zemina + 0 % cementu + 3 % vápna	700	30,6	nezatvrdlo	0,02	0,12	0,16
Písčítá zemina + 2 % cementu + 0 % vápna	750	28,8	nezatvrdlo	0,16	0,09	0,06
Písčítá zemina + 2 % cementu + 1,5 % vápna	730	30,6	nezatvrdlo	0,07	0,06	0,04
Písčítá zemina + 2 % cementu + 3 % vápna	750	30,6	nezatvrdlo	0,08	0,11	0,14
Písčítá zemina + 4 % cementu + 0 % vápna	800	28,8	0,16	0,25	0,24	0,16
Písčítá zemina + 4 % cementu + 1,5 % vápna	810	30,6	0,15	0,16	0,15	0,16
Písčítá zemina + 4 % cementu + 3 % vápna	710	30,6	0,15	0,19	0,26	0,25
Písčítá zemina + 6 % cementu + 0 % vápna	760	28,8	0,14	0,47	0,49	0,27
Písčítá zemina + 6 % cementu + 1,5 % vápna	810	30,6	0,15	0,16	0,15	0,15
Písčítá zemina + 6 % cementu + 3 % vápna	750	30,6	0,25	0,37	0,42	0,46

## Příloha 2 - Rozlití, vlhkost a pevnost v tlaku – zemina, pojiva a plastifikační přísada

**Tabulka 2 Rozlití, vlhkost a pevnost v tlaku – zemina, pojiva a plastifikační přísada**

Směs	Rozlití [mm]	Vlhkost [%]	f <sub>c</sub> [Mpa]			
			7 denní	14 denní	28 denní	56 denní
Jílovitá zemina + 2 % cementu + 1,5 % vápna	860	47,6	0,10	0,21	0,20	0,23
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 1 % plast. (1062)	680	47,9	0,14	0,27	0,25	0,17
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 2 % plast. (1062)	680	48,0	0,15	0,27	0,16	0,14
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 3 % plast. (1062)	680	47,2	0,19	0,26	0,20	0,19
J. zem. + 4 % cem. + 1,5 % váp. + 1 % plast. (1062)	660	59,9	0,32	0,37	0,28	0,25
J. zem. + 4 % cem. + 1,5 % váp. + 2 % plast. (1062)	690	50,1	0,30	0,36	0,24	0,20
J. zem. + 4 % cem. + 1,5 % váp. + 3 % plast. (1062)	690	54,0	0,31	0,35	0,25	0,22
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 1 % plast. (21)	700	60,4	0,14	0,20	0,30	0,36
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 2 % plast. (21)	700	59,0	0,19	0,19	0,29	0,45
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 3 % plast. (21)	690	59,9	0,12	0,24	0,40	0,44
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 1 % plast. (4088)	680	58,6	0,09	0,20	0,26	0,38
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 2 % plast. (4088)	680	57,5	0,08	0,13	0,28	0,43
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 3 % plast. (4088)	700	57,7	0,18	0,19	0,38	0,37
Písčítá zemina + 2 % cementu + 1,5 % vápna	730	30,6	nezatvrdlo	0,07	0,06	0,04
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 1 % plast. (1062)	700	27,3	0,07	0,08	0,05	0,06
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 2 % plast. (1062)	680	25,8	0,09	0,09	0,09	0,08
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 3 % plast. (1062)	680	24,7	0,09	0,10	0,09	0,09
P. zem. + 4 % cem. + 1,5 % váp. + 1 % plast. (1062)	690	30,6	0,19	0,25	0,28	0,28
P. zem. + 4 % cem. + 1,5 % váp. + 2 % plast. (1062)	700	29,2	0,20	0,25	0,32	0,27
P. zem. + 4 % cem. + 1,5 % váp. + 3 % plast. (1062)	690	27,2	0,22	0,32	0,34	0,30
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 1 % plast. (21)	700	27,2	0,08	0,11	0,11	0,09
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 2 % plast. (21)	700	29,9	0,10	0,13	0,17	0,16
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 3 % plast. (21)	690	27,3	0,11	0,14	0,11	0,12
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 1 % plast. (4088)	700	29,7	0,09	0,13	0,11	0,12
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 2 % plast. (4088)	700	27,8	0,11	0,14	0,12	0,14
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 3 % plast. (4088)	690	27,9	0,07	0,09	0,08	0,11

## Příloha 3 - Objemové hmotnosti směsí zeminy a pojiva

**Tabulka 3 Objemové hmotnosti směsí zeminy a pojiva**

Směs	OH <sub>z</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	OH <sub>z</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]			
		7 denní	14 denní	28 denní	56 denní
Jílovitá zemina	1770	1590	1420	1400	1290
Jílovitá zemina + 0 % cementu + 1,5 % vápna	1720	1560	1430	1470	1300
Jílovitá zemina + 0 % cementu + 3 % vápna	1750	1800	1570	1430	1440
Jílovitá zemina + 2 % cementu + 0 % vápna	1660	1740	1820	1610	1620
Jílovitá zemina + 2 % cementu + 1,5 % vápna	1730	1700	1610	1370	1240
Jílovitá zemina + 2 % cementu + 3 % vápna	1750	1660	1510	1400	1380
Jílovitá zemina + 4 % cementu + 0 % vápna	1720	1660	1590	1400	1320
Jílovitá zemina + 4 % cementu + 1,5 % vápna	1740	1730	1830	1450	1320
Jílovitá zemina + 4 % cementu + 3 % vápna	1780	1700	1530	1430	1380
Jílovitá zemina + 6 % cementu + 0 % vápna	1740	1650	1560	1420	1330
Jílovitá zemina + 6 % cementu + 1,5 % vápna	1780	1700	1670	1530	1360
Jílovitá zemina + 6 % cementu + 3 % vápna	1770	1670	1510	1410	1390
Písčitá zemina	1970	1890	1750	1620	1620
Písčitá zemina + 0 % cementu + 1,5 % vápna	1980	1880	1770	1650	1640
Písčitá zemina + 0 % cementu + 3 % vápna	1970	1940	1910	1600	1670
Písčitá zemina + 2 % cementu + 0 % vápna	2050	1960	1860	1720	1700
Písčitá zemina + 2 % cementu + 1,5 % vápna	1990	1890	1790	1630	1650
Písčitá zemina + 2 % cementu + 3 % vápna	1990	1890	1780	1560	1620
Písčitá zemina + 4 % cementu + 0 % vápna	2000	1700	1870	1760	1710
Písčitá zemina + 4 % cementu + 1,5 % vápna	1990	1680	1720	1680	1650
Písčitá zemina + 4 % cementu + 3 % vápna	1990	1930	1820	1630	1660
Písčitá zemina + 6 % cementu + 0 % vápna	2060	1750	1790	1760	1730
Písčitá zemina + 6 % cementu + 1,5 % vápna	2000	1760	1680	1620	1640
Písčitá zemina + 6 % cementu + 3 % vápna	2020	1950	1870	1620	1650

## Příloha 4 - Objemové hmotnosti směsí zeminy, pojiv a plastifikační přísady

**Tabulka 4 Objemové hmotnosti směsí zeminy, pojiv a plastifikační přísady**

Směs	OH <sub>z</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	OH <sub>z</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]			
		7 denní	14 denní	28 denní	56 denní
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 1 % plast. (1062)	1700	1650	1510	1450	1300
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 2 % plast. (1062)	1740	1630	1510	1300	1330
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 3 % plast. (1062)	1720	1600	1480	1350	1320
J. zem. + 4 % cem. + 1,5 % váp. + 1 % plast. (1062)	1410	1500	1470	1280	1220



J. zem. + 4 % cem. + 1,5 % váp. + 2 % plast. (1062)	1720	1550	1560	1320	1280
J. zem. + 4 % cem. + 1,5 % váp. + 3 % plast. (1062)	1690	1520	1480	1290	1280
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 1 % plast. (21)	1600	1740	1590	1430	1240
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 2 % plast. (21)	1600	1720	1610	1390	1290
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 3 % plast. (21)	1610	1690	1550	1430	1270
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 1 % plast. (4088)	1660	1710	1620	1480	1330
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 2 % plast. (4088)	1640	1710	1640	1480	1300
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 3 % plast. (4088)	1620	1720	1630	1430	1300
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 1 % plast. (1062)	2050	1940	1740	1710	1650
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 2 % plast. (1062)	2060	1940	1740	1730	1670
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 3 % plast. (1062)	2090	1950	1770	1750	1740
P. zem. + 4 % cem. + 1,5 % váp. + 1 % plast. (1062)	1990	1890	1670	1680	1640
P. zem. + 4 % cem. + 1,5 % váp. + 2 % plast. (1062)	2010	1920	1650	1740	1690
P. zem. + 4 % cem. + 1,5 % váp. + 3 % plast. (1062)	2020	1920	1680	1700	1710
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 1 % plast. (21)	2030	2020	1830	1690	1660
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 2 % plast. (21)	1980	1900	1790	1660	1610
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 3 % plast. (21)	2020	1930	1790	1670	1600
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 1 % plast. (4088)	1970	1720	1720	1630	1620
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 2 % plast. (4088)	2000	1760	1780	1710	1610
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 3 % plast. (4088)	2010	1680	1680	1680	1630

## Příloha 5 - Smrštění a vlhkosti směsí zeminy a pojiva

**Tabulka 5 Smrštění a vlhkosti směsí zeminy a pojiva**

Směs	Smrštění [%]				Vlhkost [%]				
	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní	Při míchání	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní
Jílovitá zemina	0	10,2	12,3	13,0	34,2	29,8	17,2	13,3	8,1
Jílovitá zemina + 0 % cementu + 1,5 % vápna	2,5	3,3	7,9	7,2	44,2	31,4	16,9	7,8	1,9
Jílovitá zemina + 0 % cementu + 3 % vápna	1,8	1,1	1,6	1,9	38,9	33,4	21,2	12,2	9,5
Jílovitá zemina + 2 % cementu + 0 % vápna	0,0	9,5	11,1	12,6	55,4	45,7	37,0	22,2	18,8
Jílovitá zemina + 2 % cementu + 1,5 % vápna	2,3	5,9	5,2	4,2	47,6	34,8	21,9	14,7	7,6
Jílovitá zemina + 2 % cementu + 3 % vápna	1,0	0,5	2,3	1,9	38,9	28,3	21,2	10,4	9,1
Jílovitá zemina + 4 % cementu + 0 % vápna	0,0	1,3	4,9	4,4	51,6	49,8	39,8	21,1	18,4
Jílovitá zemina + 4 % cementu + 1,5 % vápna	0,2	2,1	1,2	0,8	36,2	29,8	31,0	11,3	6,8
Jílovitá zemina + 4 % cementu + 3 % vápna	0,3	0,2	0,8	1,0	38,9	29,3	19,5	14,0	11,5

Jílovitá zemina + 6 % cementu + 0 % vápna	0,0	-0,1	2,2	3,0	50,2	44,8	38,4	24,1	18,7
Jílovitá zemina + 6 % cementu + 1,5 % vápna	0,1	0,3	1,5	1,1	35,2	28,5	28,1	15,5	5,5
Jílovitá zemina + 6 % cementu + 3 % vápna	0,0	0,7	1,0	1,1	38,9	28,1	16,9	10,6	12,4
Písčítá zemina	0,0	0,0	0,2	0,6	30,6	25,8	15,6	9,3	9,1
Písčítá zemina + 0 % cementu + 1,5 % vápna	0,0	1,2	0,2	0,5	30,6	25,6	13,6	9,5	9,9
Písčítá zemina + 0 % cementu + 3 % vápna	0,0	1,6	0,9	1,6	30,6	29,3	16,0	7,7	8,1
Písčítá zemina + 2 % cementu + 0 % vápna	0,0	-0,3	0,0	-0,1	28,8	24,3	18,8	9,6	9,5
Písčítá zemina + 2 % cementu + 1,5 % vápna	0,0	0,5	-0,1	0,1	30,6	25,7	18,1	11,6	10,5
Písčítá zemina + 2 % cementu + 3 % vápna	0,0	0,2	0,3	0,5	30,6	25,4	15,5	4,7	6,9
Písčítá zemina + 4 % cementu + 0 % vápna	0,0	-0,3	-0,3	0,4	28,8	13,6	18,8	11,8	6,8
Písčítá zemina + 4 % cementu + 1,5 % vápna	-0,5	0,2	0,0	0,4	30,6	13,6	11,0	11,3	10,1
Písčítá zemina + 4 % cementu + 3 % vápna	0,0	0,2	0,3	0,5	30,6	27,7	20,2	7,6	8,6
Písčítá zemina + 6 % cementu + 0 % vápna	0,0	-0,5	-0,7	-0,3	28,8	13,6	15,2	14,4	7,9
Písčítá zemina + 6 % cementu + 1,5 % vápna	-0,1	0,5	0,0	-0,1	30,6	16,3	10,8	8,9	8,7
Písčítá zemina + 6 % cementu + 3 % vápna	0,0	0,7	-0,5	2,2	30,6	27,3	22,3	10,4	8,3

## Příloha 6 - Smrštění a vlhkosti směsí zeminy, pojiva a plastifikační přísady

**Tabulka 6 Smrštění a vlhkosti směsí zeminy, pojiva a plastifikační přísady**

Směs	Smrštění [%]				Vlhkost [%]				
	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní	Při míchání	7 denní	14 denní	28 denní	56 denní
Jílovitá zemina + 2 % cementu + 1,5 % vápna	2,3	5,9	5,2	4,2	47,6	34,8	21,9	14,7	7,6
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 1 % plast. (1062)	1,8	2,8	3,6	3,1	47,9	37,5	27,8	22,1	15,6
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 2 % plast. (1062)	0,7	1,7	2,6	3,8	48,0	37,6	28,1	15,9	14,5
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 3 % plast. (1062)	2,6	2,7	4,3	3,6	47,2	32,9	27,0	15,9	15,5
J. zem. + 4 % cem. + 1,5 % váp. + 1 % plast. (1062)	1,8	2,8	5,3	4,8	59,9	59,3	57,1	35,0	34,9

J. zem. + 4 % cem. + 1,5 % váp. + 2 % plast. (1062)	0,5	1,7	4,0	3,3	50,1	37,1	33,8	16,8	16,6
J. zem. + 4 % cem. + 1,5 % váp. + 3 % plast. (1062)	1,2	4,3	3,9	4,0	54,0	40,6	32,8	19,2	19,0
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 1 % plast. (21)	6,7	6,0	8,2	7,5	60,4	47,0	43,6	28,7	20,9
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 2 % plast. (21)	6,4	5,5	7,9	8,5	59,0	44,4	42,1	26,3	20,3
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 3 % plast. (21)	4,5	6,4	7,7	8,4	59,9	48,6	39,9	28,7	20,3
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 1 % plast. (4088)	3,5	4,5	4,3	6,2	58,6	50,3	41,8	34,1	22,5
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 2 % plast. (4088)	3,3	2,9	6,4	7,6	57,5	48,8	46,6	30,7	18,9
J. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 3 % plast. (4088)	5,7	4,9	7,9	7,6	57,7	43,7	42,2	25,3	20,4
Písčitá zemina + 2 % cementu + 1,5 % vápna	0,0	0,5	-0,1	0,1	30,6	25,7	18,1	11,6	10,5
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 1 % plast. (1062)	-0,1	0,0	0,6	0,6	27,3	18,5	8,8	5,5	7,0
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 2 % plast. (1062)	0,1	0,3	0,7	0,4	25,8	17,7	7,8	5,9	5,3
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 3 % plast. (1062)	0,1	0,6	0,5	-0,6	24,7	14,3	5,5	6,0	5,8
P. zem. + 4 % cem. + 1,5 % váp. + 1 % plast. (1062)	0,6	0,3	0,5	0,3	30,6	20,8	9,3	10,5	10,0
P. zem. + 4 % cem. + 1,5 % váp. + 2 % plast. (1062)	-0,1	0,0	0,5	0,3	29,2	22,1	7,6	11,4	9,3
P. zem. + 4 % cem. + 1,5 % váp. + 3 % plast. (1062)	-0,4	0,0	-0,4	0,2	27,2	19,5	8,0	8,4	6,1
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 1 % plast. (21)	1,7	0,1	-0,1	0,1	27,2	19,8	11,9	7,1	6,3
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 2 % plast. (21)	-0,3	0,3	0,2	0,3	29,9	22,0	15,1	8,1	7,3
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 3 % plast. (21)	0,1	0,7	0,5	0,5	27,3	21,3	12,8	7,2	4,4
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 1 % plast. (4088)	0,6	0,5	0,3	0,2	29,7	10,4	10,5	7,1	5,7
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 2 % plast. (4088)	0,6	0,3	0,9	0,5	27,8	10,7	12,9	6,7	4,6
P. zem. + 2 % cem. + 1,5 % váp. + 3 % plast. (4088)	0,4	0,6	0,4	0,6	27,9	8,9	8,5	7,4	3,9